非正弦电磁波的传播

〔美〕H. F. 哈尔姆斯 著
沈士团 藕锋 译 张其善 审校

人民邮电出版社／人民邮电出版社／人民邮电出版社

非正弦电磁波的传播

〔美〕H.F.哈尔姆斯　著
沈士团　藕锋　译
张其善　审校

人民邮电出版社

Propagation of Nonsinusoidal
Electromagnetic Waves
HENNING F. HARMUTH
Department of Electrical Engineering
the Catholic University of America
Washington, D. C.
1986
ACADEMIC PRESS, INC.

内 容 提 要

本书是美国天主教大学哈尔姆斯（*Harmuth*）教授的关于非正弦电磁波传播理论的一本专著，作者通过把磁流密度引入麦克斯韦尔方程组，对麦克斯韦尔方程进行修正，使之可以用来研究有损介质中有始有终信号的传播问题，对研究非正弦信号的反射、散射等问题提供了理论基础，可以指导军事上的隐身和反隐身技术的研究。

本书适合从事通信、雷达及隐身和反隐身技术研究的科技人员阅读，也可作为高等院校有关专业的高年级和研究生的参考书。

非正弦电磁波的传播
〔美〕H.F.哈尔姆斯 著
沈士团 藕锋 译
张其善 审校
责任编辑：王晓明
•
人民邮电出版社出版
北京东长安街27号
河北省邮电印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行
各地新华书店经售
•
开本：787×1092 1/32 1990年6月 第一版
印张：10 页数：160 1990年6月河北第1次印刷
字数：223千字 印数：1—1 300册
ISBN7-115-04041-9/TN·259
定价：4.15元

译 者 序

一个多世纪以来麦克斯韦尔方程组一直是研究电磁波的理论基础。理论和实践表明麦克斯韦尔方程组对无限延伸的周期的正弦波是非常适用的。但事实上许多实际信号并不是无限延伸的周期性正弦波，如雷达信号就是属于这种情况，它是一种有始有終的正弦脉冲信号。麦克斯韦尔方程组不适于用来研究有损介质中有始有终信号的传播问题，因为它在这种情况下无收敛解。作者通过把磁流密度引入麦克斯韦尔方程组，对它进行了修正，并在对方程求解最后令磁流密度趋于零，从而使方程在上述情况下有收敛解。修正了的麦克斯韦尔方程组可以用来研究信号（如非正弦脉冲波）的反射和散射，以及有损介质对这种波的吸收等问题，这些都是研究非正弦信号传播等问题的理论基础。对军事上的隐身和反隐身技术具有理论指导意义。

本书共分六章。第一章为引言，从偏微分方程的解，引出了修正的麦克斯韦尔方程组；第二章介绍了传导介质中的非正弦波；第三章论述了波激励的时空变换问题；第四章介绍了波在介面上的反射和传播；第五章讨论了信号的传播速度问题，并说明了为什么作者在本书的理论中引入磁荷和磁流密度的概念；第六章为附录、介绍了有损介质中的球面波问题。

本书是作者继“序率理论基础及应用”等书以后的又一本专著。我们把它介绍给我国读者，对我国从事非正弦波理论研究和工程实践的同志以及从事隐身和反隐身技术研究的同志是

十分有益的。我们也非常感谢哈尔姆斯教授专门为我们写了中译本序言。

由于译者水平所限，缺点错误在所难免，敬祈读者指正。

译　　者

一九八八年五月于北京

中文版前言

众所周知，麦克斯韦尔方程组总是有着三个不足。它们不包含质量的概念，这样也就不能用于带电粒子；它们解释不了能量的量化；也解释不了电荷的量化。采用麦克斯韦尔方程组的矢量和标量位，量子理论成功地把质量和能量的量化同麦克斯韦尔方程组结合起来了。但是仍然解释不了电荷的量化问题。狄拉克指出磁荷的存在通过构造薛定谔方程可引出电荷的量化。

对在有损介质中电磁场的暂态研究表明人们不可能从数学上正确地推导出麦克斯韦尔方程组的解。然而，引入磁流密度就有可能获得这样的解，并且如果在最后使磁流密度为零，那么解将保持有效。这样由于发现了麦克斯韦尔方程组的这一第四个不足，提出了磁流或磁荷的存在，但它们正象电荷的量化一样仍然不可解释。

到目前为止，我们仅有实验的暗示而并没有证明磁荷的存在，但我们现在有两个独立的理论结果，而这两个理论结果是在要求磁荷存在条件下获得的。

H.F.哈尔姆斯

1987年7月30日

前　言

自从一个世纪前麦克斯韦尔发表他的理论以来，电磁波理论一直是以无限延伸的周期性正弦波的概念为基础的。这个理论很适用于解决实际问题，但在理论上对有些问题我们总感到若有所失。在麦克斯韦尔的理论范畴内，从来没有得到过满意的信号传播速度的概念。经常提到的群速在两个方面总是不对的，其中之一就是：无线电通过大气传输时群速总是大于光速。

除传播速度之外，我们也无法在文献中找到关于在有损介质中有始有终信号传播的麦克斯韦尔方程组的解。也许有人认为其原因在于在求解上遇到实际困难，但这并不完全正确。本书将要推导的解在数学上是相当复杂的，只能通过计算机画出曲线来求得有用的解。然而，计算机出现已经40年了，至少在近20年中，它们已经可以做足够精确易行的计算，来得到所要求的结果。还有很多迹象表明计算机还可以进一步研究这些结果。在雷达技术中，人们要知道的是（正弦）脉冲反射或散射所产生的波，而不是周期性的正弦波。在隐身技术中，人们要研究的是脉冲的吸收，而不是无限延伸的周期波的吸收。军事科学家们对这些问题已作出了大量的努力，都没有得到满意的结果，这就很清楚地表明肯定有某种问题超出了数学和计算的范围而没有得到解决。

最近的研究表明错误就在于麦克斯韦尔方程组的本身，而并非在于它的解。一般来说，麦克斯韦尔方程组不可能对在有损介质中传播的信号有解。更为科学地说：当波的相对带宽不

可忽略并在损耗不可忽略的介质中传播时麦克斯韦尔方程组是不适用的。

通过引入磁流密度的概念可以弥补麦克斯韦尔方程组的上述不足。作这种弥补本身比原来的不足更令人吃惊。因为一般认为，人们还从来没有观察到磁流，并且据对磁单极子的研究可知，磁流密度可以通过所谓的对偶变换的方法消去或产生。在计算中遇到的奇异点可以解释这些令人困惑的问题。如果人们在出现最终的奇异点之前就选择磁流密度为零，则就得不到解。反之，如果在最终的奇异点出现之后才令磁流密度为零，则可以得到解。

作者在这里愉快并衷心地感谢给本书提供帮助的人们。十多年来，*IEEE*电磁兼容会刊的编辑舒尔茨（*R. B. Schulz*）一直帮助作者在无限延伸的周期性正弦波之外的非正弦领域进行各种尝试并取得进展。澳大利亚悉尼大学电子工程学院的柯勒（*T.T.Cole*）和应用数学系的塞伯利（*J.S.Seberry*）帮助作者获得电子工程方面的瓦特桑（*W.G.Watson*）旅行基金。本书的一部分就是利用这项经费进行研究而写成的。科威特大学电子工程和计算机科学系的胡桑（*Malek G.M.Hussain*）和埃及亚历山大大学应用数学物理系的伯勒斯（*R.N.Boules*）提供了某些复杂积分函数的计算机曲线。

符　号　表

为了更加符合国际统一标准，本书符号参考格拉德施特恩（*Gradshteyn*）和里兹克（*Ryzhik*）（1980）的著作：积分，级数和乘积表。双曲正弦和余弦函数记作sh$x$和ch$x$。sin$x$和sh$x$的反函数是arc sin$x$和arcsh$x$，而$\sin^{-1}x$和$\mathrm{sh}^{-1}x$表示为1/sin$x$和1/sh$x$。正切函数记作tg$x$和th$x$而不用tan$x$和tanh$x$表示。单位矢量直角坐标记作$\mathbf{e}_x$，$\mathbf{e}_y$，$\mathbf{e}_z$，球坐标记作$\mathbf{e}_r$，$\mathbf{e}_\theta$，$\mathbf{e}_\varphi$。矢量**A**的幅值记作A。

$a=2^{-1}c(Z\sigma+s/Z)=2^{-1}c^2(\mu\sigma+\varepsilon s)=(\sigma/\varepsilon+s/\mu)/2$
$=\alpha+\alpha'$
$[s^{-1}]$，式(2.1－50)

$b^2=(2\pi\kappa)^2+s\sigma=\beta^2+s\sigma=\beta^2+1/L^2$ $[m^{-2}]$，
式(2.1-50)

$c=(\mu\varepsilon)^{-1/2}$[m/s]，光速

d，见式(2.4-20)及下文

j，虚数单位

$k=j_\gamma''$ [m^{-1}]，复角波数，式(2.2-4)

$K=(2\pi)^{-1}(a^2/c^2-s\sigma)^{1/2}$[$\mathrm{m}^{-1}$]，式(2.1-63)

$L=(s\sigma)^{-1/2}$ [m]

p_e，p_e'，见式(2.6-13)

q_0，q_0'，见式(2.5-4)

q_e，q_e'，见式(2.9-6)

q_s，q_s'，见式(2.4-6)

$Q=(1-e^{-\Delta T/\bar{\tau}})^{-1}$，式(2.3-1)

$r(t)$，指数斜坡函数，图1.2-4b

s，磁导率〔V/Am〕

$S(t)$，阶跃函数，图1.2-3

$t'=t-xc^{-1}\sin\vartheta$，式(3.2-33)

$Z=(\mu/\varepsilon)^{1/2}$〔V/A〕，波阻抗

Z_s，正弦波波阻抗，式(2.2-15)和(4.2-4)

$\alpha=Zc\sigma/2=\sigma/2\varepsilon$〔$s^{-1}$〕，式(2.1-66)

$\alpha'=s/2\mu$〔s^{-1}〕，式(3.5-5)

α''，正弦波衰减常数，〔m^{-1}〕，式(2.2-6)

$\beta=2\pi\kappa$〔m^{-1}〕，正弦波的角波数或相位常数

γ，时间常数倒数〔s^{-1}〕，式(2.1-50)

γ''，正弦波传播常数〔m^{-1}〕，式(2.2-3)

$\delta=2d/Z\sigma\ll 1$，式(2.4-48)

ε，介电常数〔As/Vm〕

$\eta=\beta c/\alpha$，式(2.1-78)

ϑ，角度

ϑ_i，ϑ_r，ϑ_t，入射，反射和传输角

$\theta=\alpha t$，式(2.1-78)

$\theta'=\alpha t'$，式(3.2-50)

κ，波数〔m^{-1}〕

μ，磁导率〔Vs/Am〕

$\zeta=\alpha y/c$，式(2.1-78)

$\zeta'=(\alpha y/c)\cos\vartheta$，式(3.2-50)

ρ，电荷密度〔Asm^{-3}〕

ρ_s，反射系数或垂直极化波函数

ρ_p，反射系数或平行极化波函数

$\tau = 1/2a$ 〔s^{-1}〕，式(2.3-15)；$\tau = 1/2\alpha$，当$s = 0$时

τ_S，垂直极化波的传输系数

τ_P，平行极化波的传输系数

τ_E，τ_{ES}，τ_{EP}，电场强度的传输函数

τ_H，τ_{HS}，τ_{HP}，磁场强度的传输函数

φ，角度或函数$\varphi(y)$

ϕ，标量位〔V〕

$\omega = 2\pi f$，角频率〔s^{-1}〕

目 录*

---

* 从1.1节到6.1节的每一节中，公式的编号都是按各自顺序排列的。若参考另一节的某个式子时，便把该节的编号写在该式的前面，例如式(2.1-50)表示2.1节中的式(50)。

每一节的插图和表格也是按各自的顺序排列的，首先写出该节的编号，例如图1.2-1，表4.2-1分别表示1.2节中图1和4.2节中表1。

参考资料是以作者的名字和出版的年份用括号表示的。如果同一作者在某一年份列出不止一份参考资料，则以小写拉丁字母分开。

第一章　引　言

1.1　偏微分方程的解

电磁波传播的理论研究开始于麦克斯韦尔方程组，假定所研究的波传播介质的磁导率、介电常数以及电导率均为常数，要讨论的就是一组常系数的线性偏微分方程。

这类方程组的经典解法有达朗贝尔①的特征值法和傅里叶②的驻波法③。达朗贝尔法用来解一维波方程或弦振动方程很奏效。傅里叶法则更适用于许多其它的偏微分方程，但它们的解一般用积分式表示，在出现电子计算机以前，不可能求得数值结果。

由于求偏微分方程的通解有一定的难度，常常使得科学家们只局限于求特解。为求这样的特解，第一步几乎总是采用贝努利乘积法来分离变量。考虑有三个空间变量和一个时间变量的方程组。若采用直角坐标，分离变量法会导出空间变量的正、余弦函数；若采用柱坐标则会导出柱函数；球坐标导出球函数等等。人们总是把时间看作直角坐标系中的一根轴，因此时间变量总是$e^{\alpha t}\sin\omega t$或$e^{\alpha t}\cos\omega t$的形式。这就是正弦函数在电通信和物理学领域占有重要位置的主要原因之一。

在电通信中，按照定义，人们感兴趣的是信号和信息传

---

① 达朗贝尔，数学家，1717——1783。

② 傅里叶，数学家，1768——1830。

③ 这个方法实际上首先是由贝努利（数学家，1700——1782）用于流体动力学（1738）。他的贡献在于常用的分离变量的贝努利乘积法。

输。在物理学中，基于信号有限传播速度的概念，狭义相对论的出现，信号和信息的传输成为至关重要的问题。

正弦时变的麦克斯韦尔方程组的解不能提供有关信号传播的任何信息，因为信号仅能用非正弦波或函数表示。以时间作为变量的周期或解析函数波的信息传输率为零，而正弦函数既是周期的，又是解析的。信息传输速率为零的原因就在于周期性时间函数若已知一个周期，那么就知道所有时间的函数值；而对于解析时间函数，若已知某一时刻的无穷小邻域内的值，则对所有时间函数值均已知。既然正弦函数在整个区间$-\infty<t<+\infty$上是周期和解析的，所以在时刻$t=-T$后（T为任意大，有限）接收到正弦波所获得的信息为零。

信号总有始终，矩形脉冲④就是一种最常见信号的表达形式。脉冲可以用正弦函数和傅里叶变换来逼近。然而，当在有损介质中传播时，这样的逼近无法告诉我们具有初始时变的矩形脉冲的电磁波将如何变化。

为了获得麦克斯韦尔方程组的一般解，必须找一个能满足三个要求的函数。第一，必须满足麦克斯韦尔方程组，正弦时间函数以及它们的叠加可以满足这个要求。第二，必须满足边界条件，我们可以看到采用傅里叶变换法可以做到这一点。第三，必须满足初始条件；这一要求已经超出了傅里叶变换的范围。

就作者所知，克里诺夫（*Krylov*）(1929)在根据电报方程计算传输线上的电流、电压时，将一个满足初始条件的一般方法引入电通信。这一方法通过斯米尔诺夫（*Smirnov*）的著作

④ 在狭义相对论中，信号通常用“光闪”来表示，如果我们需要更具体的时变函数式，那么可以由矩形脉冲或正弦脉冲来表示。对于光子，如果把它看作粒子的话，用矩形脉冲表示比较合适；如果把同样的光子看作波的话，用正弦脉冲则更合适。

而众所周知，该书已被译成几种语言（1964，*Vol*. 2，*Ch*. VII）。

有了满足初始条件的方法以及电子计算机之后，就可以算出由傅里叶变换法所导出的积分式的数值结果。由此，也许人们可望在本世纪后期得到许多表示不同信号（或非正弦解）的麦克斯韦尔方程组的解。但情况不是这样。

因为麦克斯韦尔方程组可以有正弦或周期时变函数的解。但一般得不到非正弦及非周期时间变量的信号的解。迄今为止，已知唯一的例外就是信号在无损介质中传播时，在一个空间变量情况下，导出一维波动方程，并由达朗贝尔法解出其通解。

为举例说明麦克斯韦尔方程组的缺陷，考虑一电磁装置。在 $t=0$ 时刻加入电流，并在有限时间内，以任意方式加至常数值 I，在足够长的时间内，可观察到恒定的磁场强度，但不存在电场强度。然而，当电流由 0 增至 I 时，一定有由电磁装置激发的电磁波并传播出去，麦克斯韦尔方程组给出了波在无损介质中传播的解，但这个解与观察结果并不相符，电场强度并没有消失。无损介质的假定显然是不切实际的，对有损介质又无解，可见这样一个简单又完全实际的问题已超出了麦克斯韦尔方程组的应用范畴。

更一般地说，当波的相对带宽⑤不可忽略并在损耗不可忽略的介质中传播时，麦克斯韦尔方程组是不适用的。

这样首要的任务是必须修正麦克斯韦尔方程组，以便可以对具有时变参量并在有损介质中传播的波进行求解。一旦我们

---

⑤ 波的相对带宽定义为比值 $(f_H-f_L)/(f_H+f_L)$，这里 f_H 为傅里叶表示中的最高频率，f_L 为最低频率。术语“非正弦波”是术语“相对带宽不可忽略的波”的缩写语。