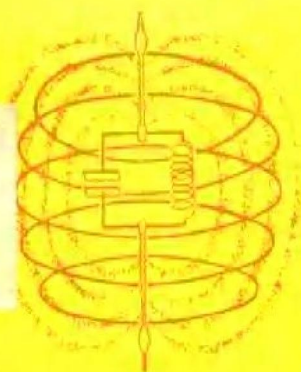


无线电计量测试丛书

6

高频、微波场强与干扰 的计量测试

吴毅 都世民 杨盛祥 黄志洵 编著



计 量 出 版 社

内 容 提 要

本书是无线电计量测试丛书的第六分册,着重阐述高频、微波场强标准的建立、场强和干扰的测量方法及介绍测量仪器和附属设备。全书共9章,第一、二两章介绍场强的理论、场区划分及测试基础知识;第三、四章论述近区和远区场强标准和测试方法;第五章专门论述横电磁波室的原理和应用;第六、七章讨论远、近区场强计及其技术;第八章论述电磁干扰及其测量问题;第九章介绍了国内外近年来场强、干扰测试的新发展。

本书可供具有中等以上文化程度从事电子、无线电计量测试科技人员及大专院校有关专业师生参考,也可作为计量测试人员培训用书。

无线电计量测试丛书 6

高频、微波场强与干扰的计量测试

吴毅 鄧世民 编著
杨盛祥 黄志洵
责任编辑 倪伟清

—*

计量出版社出版
(北京和平里11区7号)

北京计量印刷厂印刷

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 印张 11 5/8
字数 269 千字 印数 1—7 000
1986年3月第一版 1986年3月第一次印刷

统一书号 15210·498

定价 2.70 元

无线电计量测试丛书编委会

主 编： 汤世贤

副主编： 周清一 吴鸿适 张世箕 席德熊

编 委： (以姓氏笔划为序)

王义举 王立吉 戈锦初 古乐天

汤世贤 刘全宝 李世雄 吴鸿适

张世箕 张 伦 陈成仁 周清一

郭允晟 夏虎林 倪伟清 诸维明

席德熊 黄志洵

本分册责任编辑： 黄志洵 席德熊

出版前言

无线电计量测试丛书是根据计量出版社关于按学科分类组编计量测试丛书的总体设想，由本编委会邀请作者、组织编写和审定的。其目的是比较系统地传播无线电计量测试科学技术知识，促进电子学与无线电技术的发展，以适应科技进步和社会主义现代化建设的需要。

本丛书主要论述高频和微波电磁量的计量测试问题，一般不包括直流和低频的内容。丛书第一分册为“概论”，其余各册分别阐述各主要参量及数据域的测试。“丛书”各分册既保持了相互联系，又是一本专题论著，具有独立性，因此将按成书先后陆续出版。

本丛书的主要读者对象，是具有中等以上文化程度的无线电计量测试工作者、有关专业的科学技术人员、大专院校师生、计量管理干部，也可作为计量人员的培训用书。

无线电计量测试丛书编委会

序

电磁场是物质的一种形态。所谓高频、微波波段的无线电波，就是指波长在一定范围（短波至毫米波）内的交变电磁场。描述交变电磁场的状态，要用空间的矢量函数（电场强度 E 、磁场强度 H ）来表示。关于场强和干扰的测量问题，涉及许多方面（电磁理论、天线、电波传播、传输线、测量仪器及电路）的有关知识。到目前为止，还缺少这方面的专门著作。

本书着重论述了场强标准的建立、场强和干扰的测量方法及介绍测量仪器和附属设备。并以辐射干扰为主论述了电磁干扰及其测量。第一、二两章介绍了场的理论、场区划分和测量场强常用的天线型式及测试场地的基础知识，后面各章的内容均与此有关。第三、四两章论述了近区和远区场强标准，介绍了一些主要测试方法。第五章专门讨论横电磁波室的原理、技术和应用，这是有鉴于当前的发展动向而作的安排。第六、七两章专门讨论场强计，既阐述了过去的工作，也介绍了较新的技术。第八章论述了电磁干扰及其测量问题；当然，由于干扰、抗干扰有关技术庞大复杂，不可能很全面地论述，只能给读者提供一些基本概念和原理。此外，还介绍了国外近年来的新发展和新动向，详见第九章。

本书几位作者的分工如下：吴毅（第三、六、七、八章）、都世民（第一、二章）、杨盛祥（第四章）、黄志洵（第五章）、第九章的第一、三、五节由杨盛祥撰写，第二节由都世民撰写，第四节由吴毅撰写。本书完稿后，由黄志

洵、席德熊负责全书的审校，最后由本丛书副主编吴鸿适教授审定。

本书采用国际单位制 (SI)。矢量符号用黑斜体，矩阵符号用正黑体。参考文献放在各章的末尾。

我们才疏学浅，且因篇幅所限，本书的缺点和疏漏一定不少，切盼读者和有关专家批评指正。

作者同识

1984年2月

目 录

序

第一章 电磁场理论基础	(1)
第一节 概述	(1)
第二节 电磁场方程及边界条件	(2)
第三节 标量位和矢量位	(11)
第四节 平面波	(13)
第五节 电磁波的传播	(16)
第六节 辐射场的三个重叠区域	(21)
参考文献	(29)
第二章 测量场强和辐射干扰的常用天线	(31)
第一节 概述	(31)
第二节 天线主要电气特性参数的定义	(34)
第三节 天线测试场	(46)
第四节 常用天线型式	(59)
第五节 宽带有源各向同性天线	(92)
参考文献	(101)
第三章 远区场强标准	(105)
第一节 概述	(105)
第二节 标准磁场法	(106)
第三节 标准环天线法	(112)
第四节 高频磁场标准	(117)
第五节 标准电场法	(122)
第六节 标准偶极子天线法	(127)
第七节 电场标准的比对	(136)
参考文献	(138)

第四章 近区场强标准	(139)
第一节 概述	(139)
第二节 球形天线法	(143)
第三节 平行板电容器法	(147)
第四节 平行双线法	(153)
第五节 单极天线法	(159)
第六节 长线天线法	(164)
第七节 波导小室法	(167)
第八节 开口波导与角锥喇叭法	(171)
第九节 并联电感线圈法	(176)
参考文献	(181)
第五章 横电磁波室原理与技术	(183)
第一节 概述	(183)
第二节 横电磁波室原理及误差分析	(185)
第三节 横电磁波室特性阻抗的分析计算方法	(191)
第四节 横电磁波室应用简介	(199)
第五节 横电磁波室性能的测量方法	(200)
参考文献	(205)
第六章 远区场强计	(207)
第一节 远区场强计的构成与工作原理	(207)
第二节 场强计天线系统传输系数的测量	(214)
第三节 场强计的屏蔽	(226)
参考文献	(233)
第七章 近区场强计	(234)
第一节 概述	(234)
第二节 近区场强计的高频探头	(235)
第三节 近区场强计的电路和工作原理	(238)
第四节 各向同性探头	(243)
第五节 近区场强计的校准	(248)
第六节 近区弱场测量技术的发展	(249)

参考文献	(255)
第八章 电磁干扰测量	(257)
第一节 概述	(257)
第二节 电磁干扰的来源与分类	(261)
第三节 电磁干扰的耦合	(264)
第四节 电磁干扰的传播	(272)
第五节 屏蔽	(278)
第六节 电磁干扰测量仪的构成与工作原理	(286)
第七节 电磁干扰测量仪主要技术特性的测量	(294)
第八节 测量电磁干扰用的其它设备	(299)
参考文献	(317)
第九章 场强、干扰计量测试中的新技术和新	
动态	(320)
第一节 引言	(320)
第二节 近场测量技术	(321)
第三节 用横电磁波室测辐射干扰的新方法	(335)
第四节 场强、干扰测量仪的智能化问题	(347)
第五节 场强标准的国际比对	(352)
参考文献	(360)

第一章 电磁场理论基础

第一节 概 述

在高频和微波波段，场强和干扰的测量对象是交变电磁场和脉冲电磁场。1823年，安培发表了电流产生磁力的基本定律。1831年，法拉第发现电磁感应现象，总结出电磁感应定律。1840年，美国人亨利获得了高频振荡。1864年，麦克斯韦总结、综合了电磁感应定律和安培的全电流定律，完善了麦克斯韦方程式，1873年发表了《电磁学通论》两卷著作，全面地论述了电与磁的相互作用。麦克斯韦在1864年就预言电磁波的存在，长时间未能证实，其关键在于未能解决如何辐射电磁波和如何探测电磁波的问题。直到1887年，德国物理学家赫兹首创了天线，第一次把高频振荡器产生的电磁波辐射到自由空间，同时又成功地接收了电磁波，开创了辐射电磁场测量，使麦克斯韦的电磁理论得到证实。

交变电磁场不同于静电场，它必须考虑电场和磁场间的相互作用和相互制约，这集中表现在两个方面：首先，电磁场是统一的、不可分割的。不论是电场和磁场，都仅仅是统一的电磁场在不同条件下的不同表现。其次，电场和磁场有直接的关系，磁场变化产生电场，电场变化产生磁场。

本章首先阐述电与磁普遍联系的两个方面，即变动的磁场产生电场和变动的电场产生磁场。写出这两个方面的数学表达式，即为电磁场的基本方程式；再引入边界条件以后，

即得到电磁场方程的完整形式；进而导出能量守恒与转换定律在电磁场中的表现——Poynting 定律；然后讨论平面电磁波及其属性。最后阐述辐射电磁场的三个重叠的区域。

基于上述讨论，拟使读者了解以下几个问题：（1）场强和干扰的测量对象是交变电磁场，它可以用电磁场的基本方程式来描述其内在规律；（2）常用测量探头的分析方法和场强测量的误差分析都是由电磁场的基本方程式出发（由于篇幅的限制，后面各章节所涉及的分析都不可能详细介绍其推导过程和结果）；（3）场强的计量测试和天线参数的测量大都是在平面波照射的情况下进行，后面介绍的场强标准和天线测试场也是在平面波照射的条件下工作的，而平面波又是电磁场方程式最简单的解；（4）由于电磁场是以波动的方式在自由空间传播，那些不需要的电波会导致电磁干扰，在分析预计电磁干扰和校准测量用的探头时，必然会涉及到电波传播问题，而电波传播问题对测量场强和干扰的误差分析又是十分重要的；（5）辐射的电磁场在自由空间可以划分为三个重叠的区域，但不能截然分开，这个原则既关系到后面各章节的划分准则，也关系到实际测量中对测量仪器、测量方法的选择和测量结果的分析，而区分近区场和远区场尤为重要。

总之，本章的目的在于帮助读者建立电磁理论的一些基本概念，以便于理解后面各章节的内容。有兴趣的读者可进一步查阅电磁波的有关专著^{〔1〕-〔8〕}。

第二节 电磁场方程及边界条件

一、电磁感应定律

电磁场方程是用来解释电与磁的现象，无论是场强和干

扰的测量原理本身，还是探头特性的分析都要借助电磁场方程。从事场强和干扰测量的工作人员，必须在一定程度上了解和运用电磁场方程。要了解电磁场方程，首先是研究电场和磁场的某些简单而又特殊的状态，包括电荷怎样产生电场和电流怎样产生磁场。然后综合这些状态提出了电磁场基本方程。再对这些方程进行数学分析，导出场的表示式，然后利用麦克斯韦方程来解决电场和磁场的各个方面的问题。

电磁感应定律就是用来解释变化的磁场是怎样产生交变电场的，它是直接建立在电磁感应现象的实验基础上。当穿过一匝线圈所包围的面积磁通量随时间变动时，这个线圈里就产生一个感应电动势（见图1-1），其关系式为

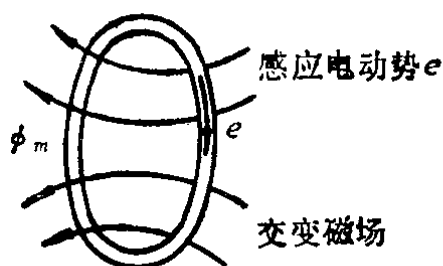


图 1-1 电磁感应定律

$$e = -d\phi_m/dt \quad (1-1)$$

式中 $d\phi_m/dt$ 为磁通量对时间的变化率。

感应电场 E 与感应电动势 e 的关系为

$$e = \oint_l E \cdot dl \quad (1-2)$$

利用关系式 $\phi_m = \iint_s B \cdot dS$ ，并比较式 (1-1) 和式 (1-2)

可得：

$$\oint_l E \cdot dl = - \frac{d}{dt} \iint_s B \cdot dS \quad (1-3)$$

上式即为电磁感应定律的积分形式，利用 Stokes 定律

$$\oint_l E \cdot dl = \iint_s (\nabla \times E) \cdot dS \text{ 可变为下列关系式}$$

$$\nabla \times E = - \frac{dB}{dt}$$

$$\nabla \times E = - \frac{dB}{dt} \quad (1-4)$$

上式表明感应电场是有旋度的，它不同于静电场。法拉第发现电磁感应现象原是在导体回路，麦克斯韦将其推广运用到非导体回路，甚至是任意回路。凡是有变化的磁场，就会沿该回路产生感应电动势，即产生交变电场。

二、全电流定律

电磁感应定律描述了交变磁场产生交变电场，而全电流定律就描述交变电场产生交变磁场。

根据安培的全电流定律，磁场强度 H 沿一闭合曲线的线积分等于曲线所包围的电流。在既有传导电流 J_c 又有位移电流 J_d 的情况下，这个电流就是全电流，可表示为

$$\oint H \cdot dl = \iint_s (J_c + J_d) \cdot dS \quad (1-5)$$

这是全电流定律的积分形式，利用 Stokes 定律可导出下列微分形式

$$\nabla \times H = \sigma E + \frac{dD}{dt} \quad (1-6)$$

上式说明：不仅传导电流能产生磁场，而且位移电流也能产生磁场。尽管位移电流的假设不能直接由实验证实，但由这一假设导出的麦克斯韦方程早已被实践证实。

三、电磁场的基本方程

前面已讨论了电场和磁场间的密切联系。如果从前两小节出发，求一般情况下电磁场的普遍规律，就得到电磁场的基本方程。我们研究电场、磁场的测量和测量仪器的校准问题，探测器在标准场中的扰动问题和电磁兼容问题等，都将

以电磁场的基本方程为出发点。

麦克斯韦方程就是电磁场的基本方程，是在全面总结电场变化产生磁场和磁场变化产生电场的现象后提出来的。根据电磁场的基本方程，从给定的无限大空间中电荷和电流的分布及它们随时间的变化规律，即可由场的初始情况来决定其发展。例如，可由辐射源的场求其远区场，也可由已知的远区场求近区场。由电磁场的唯一性定律可知，在给定边值和初始条件时，麦克斯韦方程可得到唯一的解。

式(1—4)和式(1—6)表达了电磁场的基本特性，它是我们研究电磁现象的基本出发点。为了表示电磁场的全部特性，除上述麦克斯韦的二个方程式外，还要有二组方程式，一组是表示电场和磁场本身的特性，另一组是表示媒介质与电场和磁场关系的方程式。下式是表示电场本身特性的方程，把电场和电荷结合起来，这就是高斯定律：

$$\oint_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{l} = \sum_{i=1}^n q_i \quad (1-7)$$

而表示磁场本身特性的方程，即磁通连续性定理，可写为：

$$\oint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (1-8)$$

表示媒介质与电场和磁场的关系式为：

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (\text{电介质特性方程}) \quad (1-9)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (\text{磁介质特性方程}) \quad (1-10)$$

$$\mathbf{J}_c = \sigma \mathbf{E} \quad (\text{导电媒质特性方程}) \quad (1-11)$$

综上所述，表达交变电磁场基本规律的方程式共有七个，这些方程统称为麦克斯韦方程组。现将麦克斯韦方程组归纳为表1-1和表1-2。前者给出麦克斯韦方程组的积分形式，后者是其微分形式。

表1-1和表1-2中的简谐情况，是指电磁场随时间作正

表 1-1 麦克斯韦方程组的积分形式

量纲 MKSA单位 条件	导自安培定律		导自法拉弟定律		导自高斯定律		导自高斯定律	
	磁通量	安培定律	电压	电势	电通量	库仑	磁通量	韦伯
一般情况	$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \iint_s \left(\mathbf{J}_c + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{S}$	伏特	$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \iint_s \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}$		$\oint_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_v \rho \cdot dV$		$\oint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$	
自由空间情况	$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \iint_s \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}$		$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \iint_s \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}$		$\oint_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = 0$		$\oint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$	
简谐情况	$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = (\sigma + j\omega\epsilon) \iint_s \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S}$		$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - j\omega\mu \iint_s \mathbf{H} \cdot d\mathbf{S}$		$\oint_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_v \rho \cdot dV$		$\oint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$	

表 1-2 麦克斯韦方程组的微分形式

量纲 条件	导自安培定律		导自法拉弟定律		导自高斯定律		导自高斯定律	
	磁通量/面积	安培定律	电压/面积	电势/面积	电通量/体积	库仑/体积	磁通量/体积	韦伯/体积
一般情况	$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_c + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$		$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$		$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$		$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	
自由空间情况	$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$		$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$		$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0$		$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	
简谐情况	$\nabla \times \mathbf{H} = (\sigma + j\omega\epsilon) \mathbf{E}$		$\nabla \times \mathbf{E} = - j\omega\mu \mathbf{H}$		$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$		$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	

弦变化，或称正弦电磁场。在通常情况下，分析电磁场和天线问题时，为简化起见都作此假定，这样可以对时间作微分，消去时间因子，导出麦克斯韦方程的复数形式，使电磁场问题局限在频域中。可是电磁兼容问题和电磁脉冲的测量都不能局限在频域中，还要考虑时域问题，即不能局限在简谐情况。

四、波 动 方 程

如果只讨论无源空间（即 $J_0 = 0$ 、 $\rho = 0$ ），和均匀介质的情况，那么由表 1-2 的一般情况可得

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} = \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (1-12)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1-13)$$

$$\nabla \cdot B = \mu \nabla \cdot H = 0 \quad (1-14)$$

$$\nabla \cdot D = \varepsilon \nabla \cdot E = 0 \quad (1-15)$$

若将式 (1-13) 取旋度

$$\nabla \times \nabla \times E = \nabla \nabla \cdot E - \nabla^2 E = -\mu \frac{\partial}{\partial t} \nabla \times H$$

将式 (1-12) 和式 (1-15) 代入上式得

$$\nabla^2 E = \nabla \nabla \cdot E + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

即为

$$\nabla^2 E - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (1-16)$$

同样由麦克斯韦方程可导出

$$\nabla^2 H - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = 0 \quad (1-17)$$

对表 1-2 中简谐情况, 可导出下式

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \omega^2 \mu \epsilon \mathbf{E} = 0 \quad (1-18)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} + \omega^2 \mu \epsilon \mathbf{H} = 0 \quad (1-19)$$

式 (1-16) 和式 (1-17) 即为矢量波动方程, 式 (1-18) 和式 (1-19) 称作矢量 Helmholtz 方程. 波动方程把电场和磁场的时间变化与空间变化联系到一起, 是用来说明作为时间-空间函数的场运动的最普遍方法.

根据式 (1-18) 和式 (1-19), 可得到 $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{H}$ 的每个直角坐标分量所满足的方程为

$$\nabla^2 \Psi + k^2 \Psi = 0 \quad (1-20)$$

式中 $\Psi = E_x, E_y, E_z, H_x, H_y$ 或 H_z ; 而 k^2 为:

$$k^2 = \omega^2 \epsilon \mu$$

式 (1-20) 即为标量 Helmholtz 方程.

五、Poynting 定律及其矢量

前面讨论了表征电磁波传播特性的方程, 电磁波传播时伴随着能量的传播, 我们定义单位时间内穿过与传播方向垂直的单位面积的能量为功率流, 它是一个矢量, 其方向就是该点能量流动的方向. 电磁波传播遵循能量守恒的关系, 由麦克斯韦方程可导出这个关系的功率平衡方程.

将 $\mathbf{H}$ 点乘式 (1-4) 再减去 $\mathbf{E}$ 点乘式 (1-6) 得到:

$$\mathbf{H} \cdot \nabla \times \mathbf{E} - \mathbf{E} \cdot \nabla \times \mathbf{H} = -\mathbf{H} \cdot \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \sigma \mathbf{E} \cdot \mathbf{E} - \mathbf{E} \cdot \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1-21)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} \times \mathbf{H} = \mathbf{H} \cdot \nabla \times \mathbf{E} - \mathbf{E} \cdot \nabla \times \mathbf{H} \quad (1-22)$$

若 μ, ϵ 为常量, 则