



# 通信电磁辐射 及其防护

 周建明 高攸纲 徐小超 金宏彬 编著

GREEN  
TELECOM



 人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS



# 通信电磁辐射 及其防护

周建明 高攸纲 徐小超 金宏彬 编著

GREEN  
TELECOM

人民邮电出版社  
北京

## 图书在版编目(CIP)数据

通信电磁辐射及其防护 / 周建明等编著. — 北京 :  
人民邮电出版社, 2010.6  
ISBN 978-7-115-22467-5

I. ①通… II. ①周… III. ①通信系统—电磁辐射—  
防护 IV. ①X591

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第041457号

## 内 容 提 要

本书是一本系统介绍移动通信电磁辐射的成因、效应、管理、测量、风险沟通、安全防护和电磁辐射环境影响评价的工程性图书。主要内容包括:电磁辐射的概念及成因,电磁辐射生物效应的现象、研究现状及研究趋势,电磁辐射国内外标准,移动通信基站和移动通信终端电磁辐射测量及案例分析,基站电磁辐射风险管理、风险沟通及案例分析,电磁辐射防护和移动通信电磁辐射环境影响评价法规及流程等多个方面。

本书主要面向移动通信运营商,移动通信网络设计单位,移动通信设备制造商,电磁辐射环境影响评价单位,电磁环境监测站中从事移动通信电磁辐射管理、网络设计和规划、电磁环境影响评价的管理和工程技术人员,对移动通信电磁辐射感兴趣的大专院校通信专业的师生、研究单位人员以及广大的社会公众。

## 通信电磁辐射及其防护

- ◆ 编 著 周建明 高攸纲 徐小超 金宏彬  
责任编辑 杨 凌
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号  
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
北京铭成印刷有限公司印刷
- ◆ 开本: 700×1000 1/16  
印张: 11.5  
字数: 187千字 2010年6月第1版  
印数: 1-3000册 2010年6月北京第1次印刷

ISBN 978-7-115-22467-5

定价: 39.00元

读者服务热线: (010)67129264 印装质量热线: (010)67129223  
反盗版热线: (010)67171154

# 前 言

电磁辐射是指变化的电场和变化的磁场相互作用而产生的一种能量流的辐射。世界卫生组织调查显示，过量的电磁辐射会对人体健康产生不良影响和伤害。电磁辐射污染已被公认为是在大气污染、水质污染、噪声污染之后的第四大公害，联合国人类环境大会已将电磁辐射列入必须控制的主要污染物之一。

近年来，随着移动通信成为人们日常生活中的重要组成部分，移动通信电磁辐射环境保护已经成为世界各国政府和公众广泛关注的热点问题。世界卫生组织历经 12 年的研究，对于移动通信的电磁辐射，已经给出了明确的结论：“鉴于非常低的暴露水平和迄今为止收集到的研究结果，没有令人信服的科学证据能证实来自（移动通信）基站和无线网络的微弱射频信号会导致有害的健康影响。”但是，由于移动通信网络的快速发展，世界各国关于移动通信基站的电磁辐射纠纷频频发生，电磁辐射问题日益成为影响和谐社会构建的重要问题之一。这里既有公众对电磁辐射相关知识和标准了解较少的原因，也有部分宣传过分渲染“吸引眼球”的不良效应，还有就是移动通信网络建设过程中出现的新问题等。在强调企业社会责任、倡导建设和谐社会的时代背景下，移动通信运营企业应该将基站电磁辐射环境保护、保证电磁波的使用安全作为自身一项义不容辞的责任和义务，加强电磁辐射管理，全面、系统地推进移动通信基站电磁辐射的环境保护工作。

需要指出的是，移动通信电磁辐射作为一项新鲜事物，不仅广大公众了解不多，而且对于广大移动通信运营和制造企业而言，也是一项新的挑战。为了能够向广大的社会公众客观、科学地介绍电磁辐射的相关知识、国际和国内的标准和法规，揭开移动通信电磁辐射的神秘面纱，同时介绍国内外有关电磁辐射的管理经验、防护知识和电磁辐射环境影响评价流程，解决困扰移动通信运营企业的发展难题，我们组织编写了本书。

本书的作者均为多年从事电磁辐射生物效应研究、电磁场理论研究、移动通信电磁辐射标准研究和制定、移动通信网络设计、电磁环境影响评价或电磁辐射防护的专家和学者。在实际工作中，我们感觉到，社会公众



需要一本客观、科学地讲述电磁辐射知识的图书，广大的移动通信运营商一线工作人员需要一本系统介绍国际、国内标准和法规以及国外先进的电磁辐射管理经验的图书。基于此，我们邀请了北京邮电大学、空军总医院、第四军医大学、原国家环境保护总局以及中国移动等单位的相关专家和学者共同编写了本书。

本书共分为7章，内容分别如下所述。

第1章：介绍移动通信基本网络架构和电磁辐射基础知识。

第2章：介绍电磁辐射生物效应研究的基本方法、研究现状，并指出目前生物效应研究方法的优缺点，指出了研究趋势。

第3章：介绍国际和国内电磁辐射标准组织的发展历程，国际和国内的相关电磁辐射限值标准。

第4章：介绍移动通信基站和移动通信终端的电磁辐射测量方法和测量标准，并给出了具体示例。

第5章：论述移动通信电磁辐射风险管理的基本策略，介绍了国际组织、国家政府和国际移动通信运营商先进的电磁辐射管理举措，并给出了缓解电磁辐射的案例。

第6章：介绍了职业人群和公众电磁辐射防护准则。

第7章：介绍了国家关于移动通信电磁辐射环境影响评价的规定，详细解释了环境影响评价的流程。

本书着重从多个角度来描述电磁辐射，而不仅仅是电磁辐射的生物学原理的研究。本书内容的创新之处在于以移动通信电磁辐射原理及其生物效应为核心，扩展到标准化、测量以及风险管理和防护等诸多方面，建立了一个移动通信电磁辐射相关问题的多维度架构，既能让普通公众全面了解移动通信电磁辐射的原理和基础知识，又能够让移动通信运营商、设备制造商的电磁辐射管理人员以及科研机构的专业人员掌握移动通信电磁辐射的相关法规、行业标准和管理策略。

本书的创作是集体智慧的结晶，全书内容经编写组人员反复讨论确定后分头执笔完成。本书由周建明担任主编，高攸纲担任副主编。第1章由高攸纲、沈远茂编写，第2章由刘亚宁、郭国祯、刘军叶、曾丽华、王晋、谢学军、丁桂荣、李豫蓉、陈永宾、李静、王晓武、李康樛编写，第3章由高鹏、马华兴、马文华编写，第4章由石丹编写，第5章由徐小超、金宏彬编写，第6章由徐培基编写，第7章由赵亚民编写。全书成稿后，编写组人员又进行了反复修改，最终由周建明审阅定稿，徐小超和金宏彬提



供了修改意见。

由于作者水平有限，加之时间仓促，且本领域技术也处于不断发展之中，书中内容如有不当之处，敬请读者斧正。

作 者

2010年1月于北京

# 目 录

第 1 章 移动通信与电磁辐射的相关理论基础	1
1.1 电磁波与电磁辐射	1
1.1.1 麦克斯韦方程(组)	1
1.1.2 波动方程和电磁波	3
1.1.3 电磁辐射	4
1.1.4 电磁波的传播	6
1.2 移动通信系统中的电磁辐射源	8
1.2.1 移动通信系统架构	8
1.2.2 移动通信系统中的辐射源——基站	9
1.2.3 移动通信系统中的辐射源——终端	12
参考文献	14
第 2 章 通信电磁辐射与人体健康	15
2.1 电磁生物效应的研究方法	17
2.1.1 研究对象	17
2.1.2 体外系统研究	18
2.1.3 活体影响研究	18
2.1.4 流行病学研究	21
2.2 电磁辐射的生物效应	22
2.2.1 特殊人群的生物效应	22
2.2.2 其他效应	24
2.3 生物效应的研究趋势	29
2.3.1 研究方法的趋势	29
2.3.2 对组织和系统的研究趋势	31
2.3.3 研究对象的趋势	32
2.3.4 国际电磁场(EMF)规划	35
参考文献	36
第 3 章 通信电磁辐射标准	47
3.1 通信电磁辐射标准化进程	47



3.1.1	国际标准化历史	48
3.1.2	国内标准化历史	49
3.2	通信电磁辐射标准化组织	50
3.2.1	ICNIRP	50
3.2.2	IEC	53
3.2.3	IEEE	55
3.2.4	ITU	56
3.2.5	CCSA	57
3.3	通信电磁辐射的暴露限值标准	58
3.3.1	国家标准	59
3.3.2	标准的专业术语	60
3.3.3	限值	63
	参考文献	66
第4章	通信电磁辐射测量	67
4.1	电磁辐射测量基础	67
4.1.1	远区场的测量	67
4.1.2	近区场的测量	68
4.1.3	通信基站电磁辐射中的几种现象	68
4.2	通信基站电磁辐射的测量方法	69
4.3	通信终端电磁辐射的测量方法	75
4.3.1	终端测量系统	76
4.3.2	SAR值的测量流程	79
4.3.3	SAR值的具体测量步骤	82
4.3.4	SAR测量数据的后处理	84
4.3.5	SAR测量报告的具体形式	85
	参考文献	85
第5章	通信电磁辐射风险管理	87
5.1	电磁辐射风险的表现形式	87
5.2	风险管理系统的构建	89
5.3	风险管理实践	90
5.3.1	世界卫生组织(WHO)的实践	90
5.3.2	国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)的实践	91
5.3.3	政府的管理实践	93





5.3.4	电信运营商的管理实践	97
5.4	风险沟通	102
5.5	移动基站电磁辐射缓解措施和案例	106
5.5.1	基站规划及评价	106
5.5.2	调整基站发射功率	107
5.5.3	改变天线增益与方向	108
5.5.4	改变天线架设高度	109
5.5.5	基站实际监测结果与话务量相关性分析	110
	参考文献	111
<b>第 6 章</b>	<b>通信电磁辐射防护</b>	<b>113</b>
6.1	防护原则	113
6.2	公众电磁辐射防护	114
6.2.1	设立防护区	114
6.2.2	距离防护	122
6.2.3	源头控制	124
6.2.4	时间防护	124
6.2.5	监测防护	124
6.3	职业人群电磁辐射防护	125
6.3.1	职业暴露及限值	125
6.3.2	防护措施	125
6.3.3	科学管理	129
6.4	电磁辐射防护常识	130
6.4.1	短波通信站	130
6.4.2	卫星地球站和微波站	131
6.4.3	移动电话和移动通信基站	131
6.4.4	职业防护	133
	参考文献	133
<b>第 7 章</b>	<b>移动通信电磁辐射环境影响评价</b>	<b>135</b>
7.1	评价依据	135
7.2	评价目的与作用	137
7.2.1	建设项目实行环境影响评价的目的	137
7.2.2	评价作用	137
7.3	环境影响报告文件的编制、审评和审批	139



7.3.1	对环境影响评价文件的要求	140
7.3.2	对审评和审批的要求	141
7.4	评价方法	147
7.4.1	移动通信的特点	147
7.4.2	重点对天线评价	149
7.4.3	辐射影响评价	150
7.5	评价标准	158
7.5.1	我国电磁辐射评价标准	158
7.5.2	评价时对标准的应用	160
7.6	公众参与	162
7.6.1	公众参与的意义	162
7.6.2	公众参与办法	163
7.6.3	公众参与面临的问题	165
7.7	豁免问题	166
	参考文献	167
	附录 电磁辐射照射缓解示例	168
	缩略语	173

# 第1章 移动通信与电磁辐射的相关理论基础

移动通信在过去短短的十几年时间里从无到有，飞速发展，给人们的工作、生活带来了极大便利，已成为人们在当今信息社会无法离开的通信工具。移动通信系统的一大特点就是利用无线电（电磁波）作为载体进行信息的传递。电磁波的使用打破了电话线对通信的束缚，使得人与人之间的沟通更加灵活、更加便捷。可见，产生电磁波并有效地将携带信息的电磁波辐射出去是移动通信系统的一个基本要求。因此，本章将就移动通信与电磁波辐射的相关理论基础进行介绍。

## 1.1 电磁波与电磁辐射

电磁场和电磁波是一种特殊的物质，作为其相关理论的核心，麦克斯韦方程（组）以偏微分方程组的形式准确概括了宏观电磁现象的基本规律，因此它也成为了我们进一步研究电磁波和电磁辐射特性的基本方程和出发点。

### 1.1.1 麦克斯韦方程（组）

麦克斯韦方程组由4个偏微分方程构成，它完整地描述了电磁场的散度和旋度特性，反映出了其电场分量和磁场分量之间的相互联系。

第一方程通过引入位移电流的概念，对通常的安培环路定律进行修正，得到了广义的安培环路定律。其数学表达式如下：

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_s \left( \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{S} \quad (1.1a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1.1b)$$

其中，式（1.1a）是定律的积分形式，而式（1.1b）是其微分形式。根据矢量分析中有关环流和旋度运算的知识可知，交变电磁场中磁场的旋度源就是电流密度  $\mathbf{J}$  和随时间变化的电场（位移电流）。与静态电磁场中磁场的旋度源只有电流不同，交变电磁场中的电场也是磁场的旋度源。



第二方程是广义的法拉第电磁感应定律的体现。法拉第电磁感应现象告诉我们，回路所围面积上磁通的变化会导致感应电动势的产生，如果将回路的概念扩展到空间任意的抽象闭合曲线，该规律同样存在，即广义的法拉第电磁感应定律，其数学表达式如下：

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \quad (1.2a)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.2b)$$

其中，式(1.2a)和式(1.2b)分别以积分和微分的形式给出了电场强度矢量的环流和旋度。容易发现，交变电磁场中电场是个有旋场，其旋度源就是随时间变化的磁场。对比静电场中的相关结论可知，交变电磁场中的电场不再是一个位场(势场)，交变的磁场可以产生无头无尾的旋转的电力线。

总结麦克斯韦第一方程和第二方程可以发现，除了交变的电荷和电流可以产生交变的电磁场之外，交变的电场和交变的磁场本身还可以彼此产生，互为旋度源。

麦克斯韦方程组中的另外两个方程分别揭示了电磁场中电场分量和磁场分量的散度特性，其结论和静态电磁场中的类似，即：

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_V \rho dV = q \quad (1.3)$$

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1.4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

上述两个方程表明，电场的“发散源”是电荷密度  $\rho$ ，而磁场则是无散的。

如果将上述麦克斯韦方程组中的 4 个方程和电荷守恒定律 ( $\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$ ) 结合起来可以发现：独立方程的数目要小于未知数的个数，因此方程组无法求解。究其原因，我们没有在方程组中描述同样是反映电场特性的电场强度矢量  $\mathbf{E}$  和电位移矢量  $\mathbf{D}$  之间的关系，没有给出同样是反映磁场特性的磁场强度矢量  $\mathbf{H}$  与磁感应强度矢量  $\mathbf{B}$  的关系，也没有给出电场强度  $\mathbf{E}$  和电流密度  $\mathbf{J}$  之间的关系，而这些都取决于材料的电特性。为此，我们必须引入麦克斯韦方程组的 3 个辅助方程，其具体的数学表达式如下：

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (1.5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1.6)$$



$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (1.7)$$

其中,  $\varepsilon$  称为媒质的介电常数,  $\mu$  称为媒质的磁导率,  $\sigma$  称为媒质的电导率。我们通常利用它们来分别反映材料的极化、磁化和导电的特性。

### 1.1.2 波动方程和电磁波

麦克斯韦第一方程表明, 随时间变化的电场(位移电流)会作为一个旋度源产生一个随时间变化的磁场。那么, 交变电场产生了交变磁场之后是否会就此停止呢? 答案是否定的。因为从麦克斯韦第二方程知道, 交变磁场又会作为旋度源产生交变的电场。实际上, 这种交变电场、交变磁场互为旋度源、互相激励的现象会无限地循环下去。在这种转换的过程中, 交变的电磁场会脱离场源(如天线上的交变电荷和电流), 由近及远地传播出去, 形成脱离电荷和电流存在并传播的电磁波。交变的电场和交变的磁场相互支持而存在, 互相转化而运动。我们把这种波动着的电磁场称为电磁波。

下面我们从麦克斯韦方程(组)入手, 利用波动方程来研究电磁场的波动规律, 即电磁波的基本特性。

首先, 我们分析研究一种最简单、最普遍的情况: 均匀、理想、各向同性媒质中的无源区域里的电磁场。此时, 反映媒质材料极化特性的介电常数和反映媒质材料磁化特性的磁导率都是常数, 反映媒质材料导电特性的电导率等于零, 代表电流源的电流密度和代表电荷源的电荷密度也都等于零。因此, 此时的微分形式的麦克斯韦方程(组)可写成如下的形式:

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H} &= \partial \mathbf{D} / \partial t = \varepsilon \partial \mathbf{E} / \partial t \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\partial \mathbf{B} / \partial t = -\mu \partial \mathbf{H} / \partial t \\ \nabla \cdot \mathbf{D} &= \varepsilon \nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \Rightarrow \nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= \mu \nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \Rightarrow \nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

对式(1.8)中电场强度矢量旋度表达式的两边再取一次旋度运算, 并利用矢量恒等式  $\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = \nabla \nabla \cdot \mathbf{E} - \nabla^2 \mathbf{E}$  可得电场强度矢量所满足的方程如下:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.9)$$

同理, 磁场强度矢量所满足的方程为:

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.10)$$



从数理方程的角度来看,上述关于电场强度矢量和磁场强度矢量的方程都属于无源波动方程。从其推导过程来看,波动方程包含了电场、磁场的旋度性质及散度性质,完整反映了交变电磁场中电场与磁场的相互关系以及电磁场与源的关系。因此,波动方程的解将揭示出交变场的特殊规律:波动性。波动方程也就是由此而得名的。

以最基本的均匀平面波  $E_x$  为例,它仅随  $z$  轴发生变化,因此式(1.9)就可以简化为:

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} = 0 \quad (1.11)$$

上式就是我们熟知的仅随一维空间变化的波动方程。

假设该交变电磁场是在无限空间中传播的,则根据数理方程的知识可知,该方程可以通过行波法进行求解,其通解如下:

$$E_x = f\left(t - \frac{z}{v}\right) + f\left(t + \frac{z}{v}\right) \quad (1.12)$$

其中,常数  $v$  具有速度的量纲,代表着电磁波在均匀媒质中的传播速度,即

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (1.13)$$

另外,根据行波法的相关理论,  $f\left(t - \frac{z}{v}\right)$  代表了电场  $E_x$  以速度  $v$  沿正  $z$  方向传播所形成的电磁波,而  $f\left(t + \frac{z}{v}\right)$  则表示电场  $E_x$  以速度  $v$  沿负  $z$  方向传播所形成的电磁波。

### 1.1.3 电磁辐射

前面通过求解波动方程得到了交变电磁场中场矢量的解,即电磁波。接下来,我们将继续分析产生电磁波的源以及电磁波的辐射问题。

用电磁学的术语来说,电磁波起源于时变电荷和电流。然而,为了能形成有效的辐射,该电荷和电流必须按特殊的方式分布。天线就是设计成以某种规定的方式分布,并能形成有效辐射的能量转换设备。因此,工程上通常将天线视为产生电磁波和电磁辐射的波源。天线对外发射电磁波的强度、场强的空间分布,以及辐射出去的电磁波功率的大小和能量转换的效率等问题都是我们所关心的。



天线产生电磁波辐射的问题是一个具有复杂边界的电磁场的边值问题，其严格求解是相当困难的。不仅如此，根据天线和激励源来精确求解天线上的电荷和电流分布本身也是一个极其复杂的问题。如果可以通过近似的方法得到天线上的电荷和电流分布，我们就可以利用基本天线元以及电磁场的迭加原理来计算得到各类天线的辐射场和辐射特性。

实际天线按结构形式的不同可分为线天线和面天线两大类。线天线可以被看成是由无限多个载有交变电流（或磁流）的基本小线元所构成的一类天线。这些基本元通常称为电偶极子（电基本振子、电流元）或磁偶极子（磁基本振子、磁流元）。同理，面天线也可以被看成是由无限多个载有交变电流和磁流的基本小面元所构成的一类天线，这些小面元又称为惠更斯元。

如前所述，如果我们掌握了上述3种基本元的辐射特性，就可以在考虑天线上各个电流元、磁流元的振幅、相位、方向和空间分布的基础上，按照电磁场叠加的原理分析得到各类天线的辐射特性。下面我们就以电偶极子为例，具体分析一下电磁辐射是如何产生的。

电偶极子是长度非常短的直线电流元  $Idl$ 。其中， $dl$  是电偶极子的长度，它与波长相比足够小，以至于可以认为沿线各点的电流是等幅同相的。由于电偶极子是一小段孤立的电流元，因此随着电流的流动，在其两端必然会出现等值异性的电荷，如果一端为  $+q$ ，则另一端必为  $-q$ ，其电荷量的大小及正负都会随着时间而变化，这恰似随时间而变化的两个“电极”，故得名为“电偶极子”。虽然电偶极子事实上并不存在，但是可以把实际的天线看作是无数的电偶极子连接的结果。如果我们求出了电偶极子所产生的电场、磁场，同时又知道了某天线上的电流分布规律（即若干电偶极子电流的幅度和相位），就可以根据场的叠加原理，利用积分求和的方法，求出该天线所产生的总场。

电偶极子所产生的电磁场是非常复杂的，以至于不太容易弄清这些场的特点及相互之间的关系。但是，如果把电偶极子所产生的场划分为近区场及远区场，那么各个场区内场的特点及相互关系就会变得一目了然了。

电偶极子的近区是指从源点到场点的距离远远小于波长所指代的区域。该区域内，电磁场中的磁场分量以  $H_\phi$  为主，电磁场中的电场分量以  $E_r$ 、 $E_\theta$  为主，其具体的数学表达式如下：

$$H_\phi \approx \frac{Idl}{4\pi r^2} \sin\theta \cos(\omega t - kr) \quad (1.14)$$



$$E_r \approx \frac{Idl}{2\pi\omega\epsilon} \cdot \frac{1}{r^3} \cos\theta \sin(\omega t - kr) \quad (1.15)$$

$$E_\theta \approx \frac{Idl}{4\pi\omega\epsilon} \cdot \frac{1}{r^3} \sin\theta \sin(\omega t - kr) \quad (1.16)$$

对比式(1.14)、式(1.15)和式(1.16)容易发现:不论是 $E_r$ 还是 $E_\theta$ ,它们和 $H_\phi$ 都相差 $90^\circ$ 。电场强度矢量与磁场强度矢量之间 $90^\circ$ 的时间相位差意味着由 $E_r H_\phi$ 以及由 $E_\theta H_\phi$ 所形成的功率密度的平均值等于零,即由近区场形成的坡印廷矢量的平均值等于零,亦即近区场只存在着能量的交换而没有能量的传播。因此,近区场又称为感应场。

电偶极子的远区是指源点到场点的距离远大于波长所指代的区域。该区域内,电磁场中的磁场分量以 $H_\phi$ 为主,电磁场中的电场分量以 $E_\theta$ 为主,其具体的数学表达式如下:

$$H_\phi \approx -\frac{Idl}{2\lambda r} \sin\theta \sin(\omega t - kr) \quad (1.17)$$

$$E_\theta \approx -\frac{Idl}{2\lambda r} \cdot \frac{k}{\omega\epsilon} \sin\theta \sin(\omega t - kr) \quad (1.18)$$

通过和电偶极子近区场进行对比可以发现,远区场的一个显著特点就是电场强度 $E_\theta$ 与磁场强度 $H_\phi$ 的时间相位相同。因此,它们可以形成向外传播的有功功率密度,即远区场能够形成向外(沿 $r$ 方向)传播的能量。正因为如此,远区场又称为辐射场,电磁辐射也就来源于此。

#### 1.1.4 电磁波的传播

前面在简要介绍麦克斯韦方程组的基础上,分析了电磁波以及电磁辐射的产生。下面,我们将继续分析电磁波(辐射)的传播问题。

均匀平面电磁波在理想介质中传播时,其电场分量和磁场分量互相垂直,并且都位于横截面上;考虑到它没有纵向(传输方向)分量,所以又称它为横电磁波(TEM波)。均匀平面波在同一个等相位面上电场的幅度相同,磁场的幅度也相同,电磁波的传播方向垂直于电场和磁场所构成的平面,电磁波的传播速度不会随频率而改变,因此我们称这种平面波为非色散波。

由于电磁波传播区域中填充的介质是理想的,因此没有损耗,即传播过程中电磁场的电场和磁场振幅保持不变。同理,电场和磁场的相位也保持相同,电场 $E_x$ 与磁场 $H_y$ 之比(即波阻抗 $\eta$ )是一个纯阻。若介质为





空气，则平面波的传播速度为光速  $c$ ，波阻抗  $\eta_0=377\Omega$ 。

如果媒质从理想介质变为导电媒质，则平面波在其中的传播会出现能量的衰减，其衰减的快慢用衰减常数  $\alpha$  来表示，即沿传播方向单位长度上波的幅度的衰减量。衰减常数在场量的表达式体现为  $e^{-\alpha z}$  项，因此导电媒质中沿  $z$  轴传播的电磁波的幅度会随着  $z$  的增大而减小，即电磁波的传播伴随着能量的衰减。衰减常数具体的数学表达式如下：

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2}} - 1 \right)} \quad (1.19)$$

在良导体  $\left( \frac{\sigma}{\omega\epsilon} \gg 1 \right)$  条件下，电磁波的衰减常数还可以近似表示为：

$$\alpha \approx \sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (1.20)$$

观察式 (1.19) 和式 (1.20) 容易发现，在导电媒质中传播的电磁波作为一个衰减波，其衰减常数  $\alpha$  会随着角频率  $\omega$  的增高而增大，会随着电导率  $\sigma$  的变大而变大。

在导电媒质中，电磁波传播的特点之一就是具有传输衰减，即波从表面进入导电媒质越深，场的幅度就越小，能量就变得越小，这就是趋肤效应。趋肤深度或称穿透深度是描述趋肤效应的一个重要概念、重要参量。其定义为：当场从表面进入导电媒质一段距离而使得其幅度衰减到原来（表面）幅度的  $1/e$  时，这段距离（深度）称为趋肤深度。

因为场的幅度是按照  $e^{-\alpha z}$  规律衰减的，若以当  $\alpha z=1$  时，场的幅度就只有原来的  $1/e$  了。据此可得趋肤深度  $\delta$  的表达式如下：

$$\delta = \frac{1}{\alpha} \quad (1.21)$$

将良导体媒质中的衰减常数  $\alpha$  的表示式 (1.20) 代入上式，则得：

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1.22)$$

式 (1.22) 就是良导体的趋肤深度的表示式。该式表明，频率越高，媒质的导电能力越强，趋肤深度  $\delta$  就越小。在良导体中，由于其电导率  $\sigma$  极大，电磁波一进入良导体就极快地被衰减，即趋肤深度  $\delta$  非常小。趋肤效应也是我们利用导体进行电磁辐射屏蔽的一个主要根据。

另外，导电媒质中平面波的波阻抗不再是实数，即不再是纯阻性的了。这也就表明在导电媒质中电场和磁场的时间相位不同，出现了相位差。