

中国科学院大学研究生教材系列

# 电磁兼容物理原理

陈志雨 编著

 科学出版社

中国科学院大学研究生教材系列

# 电磁兼容物理原理

陈志雨 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书是作者在中国科学院大学讲授电磁兼容课程的基础上编写的,系统介绍了电磁兼容技术的基本知识、基本概念和基本方法,着重阐述各种方法的物理原理。全书共分9章,内容包括各种类型的干扰与耦合途径、接地技术、屏蔽技术、滤波技术、电磁兼容测试技术和PCB的电磁兼容设计,同时列有理解各种电磁兼容技术必不可少的有关天线、微波和电磁场的基础理论。最后一章介绍GTEM小室在电磁兼容领域内、外的各种测试方法和最新研究成果。

本书以应用为目的,深入浅出地阐述各种方法的物理概念和物理过程,尽量避免非常烦琐的数学证明过程。本书可作为高等院校电子和电气工程学科的研究生或本科生的电磁兼容课程教学参考书,也可供从事设计和使用各种电子设备的工程师和电磁兼容测试工作者使用和参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容物理原理/陈志雨编著. —北京: 科学出版社, 2013.9

中国科学院大学研究生教材系列

ISBN 978-7-03-038624-3

I. ①电… II. ①陈… III. ①电磁兼容性—研究生—教材 IV. ①TN03

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第218285号

责任编辑: 钱俊 鲁永芳 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 赵德静 / 封面设计: 陈敬

**科学出版社** 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

**双青印刷厂** 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2013年9月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2013年9月第一次印刷 印张: 11 3/4

字数: 222,000

定价: **56.00元**

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

## 前 言

随着 21 世纪信息和计算机技术的迅猛发展和电磁环境日益恶化,电磁兼容已成为在电子领域中日益受到重视的学科,从事生产、使用电子设备的科研和技术人员都将不可避免地遇到电磁兼容性的新问题。本书为电子和电气工程学科研究生专业基础课的参考书,主要介绍了电磁兼容的基本概念、基本原理和基本方法,而且侧重点在物理原理上。

电磁干扰的核心是场,功率与信号由场来传输,电路中的导体只是充当轨道的角色引导能量流或信号流。虽然有些时候用电路理论也可以解决部分电磁干扰问题,但干扰问题的本质还是场,场才能解释很多电路理论无法解释的现象。电路理论很少论述结构的几何形状,而几何形状正是干扰现象的核心。电磁场理论是电磁兼容学科的基础,物理学是解释干扰问题的唯一工具。

电磁兼容最主要的技术是接地、屏蔽和滤波,静电放电问题也包括在接地范畴中。电磁兼容技术有不少公式和方法,但如果对方法的物理原理解释不透,对公式的来源及应用条件不清楚,并不利于工程师们在实践中正确运用各种方法和发挥创新精神。因此,本书着重论述电磁兼容领域中的一些基本概念,这些概念远远比解决某个特定的问题的能力更重要。

电磁兼容理论牵涉电路、微波、天线、电工、电磁场等多种学科的知识。大部分电磁兼容书籍各章是独立的,互相之间理论上基本没有联系。本书争取打破这一点,从第 2 章引入电、磁偶极,波阻抗概念及镜像原理,在以下各章多次使用这些概念和分析方法,力求使教材有一定的系统性。本书尽量深入浅出地阐述物理概念,而避免非常烦琐的数学证明,一些稍繁的数学证明则放在附录中。具体各章节安排如下:

第 1 章简述电磁兼容的基本概念与研究方法的特点。第 2 章是全书的理论基础,主要阐述电、磁偶极理论,波阻抗和镜像原理。这些理论也是各种电磁兼容方法中最常用的。第 3 章阐述干扰的耦合途径与抑制方法,重点为共地阻抗耦合和电感、电容性耦合。第 4 章到第 7 章主要阐述电磁兼容各种抗干扰技术。其中第 4 章为接地技术,包括安全接地、信号接地、地环路抗干扰措施、电缆屏蔽层接地技术等,也包括设备的静电放电防护问题。第 5 章为屏蔽技术,主要介绍电场屏蔽、磁场屏蔽和高频电磁屏蔽三种类型屏蔽的原理、屏蔽效能公式以及若干实用屏蔽技术,包括同轴电缆的转移阻抗、机箱孔缝屏蔽效能的分析和计算。第 6 章为滤波技术,重点阐述电源 EMI 滤波器、铁氧体滤波器的原理与使用。开关电源常引起

的共模辐射问题也在这章阐述。第 7 章阐述 PCB 的电磁兼容设计,这是很多读者最关心的部分。内容包括单层、多层板的一些设计原则,微带传输线理论与数字电路的电磁兼容问题,PCB 的共模辐射与差模辐射,以及带普遍性的辐射与敏感度的互易性问题。第 8 章阐述电磁兼容标准与测试,主要介绍测试方法与测试场地。第 9 章为 GTEM 小室的新应用,包括电磁兼容领域内和领域外的一些新的测试方法和最新研究成果,可供电磁兼容和天线的测试工作者们参考。

最后想说明的是,本书出版的宗旨是给研究生和本科生的电磁兼容课程提供教学参考书,而不是提供一部完整的教材。在高校开设电磁兼容课时,笔者建议除本书讲述的基本原理外还应结合自身的专业增加一些应用实例和方法。另外,相信本书的内容也能给实际工作中的电磁兼容工程师们提供有益的帮助;能对学生和工程师们有所帮助,是笔者最大的愿望。

由于笔者水平有限,书中难免有疏漏或不当之处,敬请批评指正。

陈志雨

2012 年 12 月 25 日

# 目 录

## 前言

第 1 章 电磁兼容概述	1
1.1 电磁兼容学科概述	1
1.1.1 电磁兼容学科基本内容	1
1.1.2 干扰源与耦合途径	2
1.1.3 电磁兼容分析方法的特点	2
1.2 常用电磁兼容术语解释	4
第 2 章 电磁辐射与远近场的基本概念	7
2.1 电、磁偶极天线与电磁对偶原理	7
2.1.1 电偶极天线的场	7
2.1.2 磁偶极天线的场	8
2.1.3 等效磁矩与电磁对偶性	8
2.1.4 阻抗特性	9
2.2 远近场概念	10
2.2.1 电、磁偶极的远近场	10
2.2.2 远场特性	11
2.2.3 近场特性	12
2.3 波阻抗与远近场判别法	13
2.3.1 波阻抗的定义, 平面波的波阻抗	13
2.3.2 近场波阻抗	14
2.3.3 远近场的实际判别方法	14
2.4 地面上方的偶极子、镜像原理	16
2.4.1 镜像法	16
2.4.2 垂直/水平电、磁偶极的镜像	16
2.5 口面天线与等效原理	17
2.5.1 口面天线与唯一性定理	17
2.5.2 面元的等效方法	18
2.5.3 等效原理的应用	19
2.5.4 三种等效方法	19

2.6	矩形口面的辐射	21
2.6.1	口面场均匀分布时矩形口面的辐射场	21
2.6.2	导电平面上缝隙的辐射	22
<b>第 3 章</b>	<b>干扰的耦合途径和抑制</b>	<b>25</b>
3.1	传导性耦合的基本形式	25
3.1.1	电路性耦合	25
3.1.2	导线的电阻和趋肤深度	25
3.1.3	电容性耦合	26
3.1.4	电感性耦合	27
3.1.5	典型传导性耦合	27
3.2	互感系数与互容系数	29
3.2.1	平行导线间的互感系数与互容系数	29
3.2.2	地面影响的物理解释	30
3.2.3	电感性耦合与电容性耦合的比较	33
3.3	传导性耦合的抑制	34
3.3.1	电路性耦合的抑制方法	34
3.3.2	感应耦合的抑制方法	35
3.4	辐射耦合与抑制	37
3.4.1	辐射耦合计算方法	37
3.4.2	辐射耦合抑制方法	38
<b>第 4 章</b>	<b>接地</b>	<b>40</b>
4.1	安全接地	40
4.1.1	机箱外壳的接地	40
4.1.2	防雷接地	41
4.1.3	接地方法与接地电阻要求	42
4.1.4	圆柱体接地电阻	42
4.1.5	一种简单的土壤电阻率自测方法	44
4.2	人体放电与设备安全	45
4.2.1	人体放电的原理	45
4.2.2	ESD 破坏性途径	46
4.2.3	二次放电	47
4.2.4	静电防护措施	48
4.3	信号接地	48
4.3.1	信号接地的分类	48
4.3.2	电子电路接地要点	51

4.3.3	信号地与屏蔽盒(机壳)的连接	52
4.3.4	导线在屏蔽罩外部的接地问题	52
4.4	地环路的抗干扰措施	54
4.4.1	地环路引起的干扰	54
4.4.2	共模扼流圈原理	57
4.4.3	同轴线抑制地环干扰的作用	60
4.5	电缆屏蔽层的接地	62
4.5.1	屏蔽层接地方式对感性耦合和容性耦合的影响	62
4.5.2	屏蔽层单点接地和两点接地	66
<b>第 5 章</b>	<b>屏蔽</b>	<b>69</b>
5.1	静电屏蔽与磁屏蔽	69
5.1.1	静电屏蔽	69
5.1.2	低频磁屏蔽	71
5.2	高频电磁屏蔽	72
5.2.1	电磁屏蔽的基本原理	73
5.2.2	屏蔽效能	74
5.3	板、筒、球的高频屏蔽效能与磁屏蔽效能	78
5.3.1	高频屏蔽效能与磁屏蔽效能公式	78
5.3.2	高频屏蔽效能与磁屏蔽效能的关系	80
5.4	同轴电缆的转移阻抗	81
5.4.1	刚性管状电缆的转移阻抗	81
5.4.2	编织屏蔽体的转移阻抗	82
5.5	缝与孔的屏蔽	88
5.5.1	孔缝屏蔽效能	88
5.5.2	孔缝屏蔽措施要点	90
5.6	通风窗的屏蔽效能	91
5.6.1	波导观点	91
5.6.2	场方程解	92
5.6.3	孔大小与孔间距对屏蔽效能的影响	94
5.6.4	金属丝网的屏蔽效能与反射衰减	96
5.6.5	通风窗屏蔽措施	98
<b>第 6 章</b>	<b>滤波</b>	<b>100</b>
6.1	反射式电磁干扰滤波器	100
6.1.1	反射式低通滤波器基本类型与原理	100
6.1.2	反射系数与阻抗失配	100



6.2	电源 EMI 滤波器	101
6.2.1	电源 EMI 滤波器的结构	101
6.2.2	电容等级与泄漏电流	102
6.2.3	电源滤波器的网络结构与阻抗搭配	104
6.2.4	电源 EMI 滤波器的安装	104
6.3	开关电源滤波器与共模辐射	105
6.3.1	开关电源及其噪声干扰特点	105
6.3.2	开关电源的共模辐射	106
6.4	吸收式滤波器	107
6.4.1	铁氧体的复磁导率	108
6.4.2	铁氧体芯的阻抗	108
6.4.3	吸收式滤波器的应用	109
<b>第 7 章</b>	<b>印制电路板的电磁兼容设计</b>	<b>112</b>
7.1	传输线基础	112
7.1.1	传输线一般理论	112
7.1.2	微带传输线	114
7.2	PCB 的基本结构	117
7.2.1	单层板和多层板	117
7.2.2	层布局原则	119
7.2.3	镜像原理与环路面积	120
7.2.4	单面板和双面板走线要点	122
7.3	PCB 的共模辐射与差模辐射	123
7.3.1	辐射和敏感度的互易性	123
7.3.2	共模电流与差模电流	125
7.3.3	局部电感与接地噪声电压	125
7.3.4	PCB 的共模辐射与差模辐射	127
7.4	数字电路的电磁兼容设计	131
7.4.1	电磁兼容设计的带宽	131
7.4.2	传输延迟与信号完整性	133
7.4.3	阻抗匹配方法与布线要点	135
7.5	多层板及系统设计	137
7.5.1	20H 原则与 3W 原则	137
7.5.2	分区与连接	138
7.5.3	去耦电容	141
7.5.4	系统的安排和连接	143

---

第 8 章 电磁兼容标准与测试	146
8.1 电磁兼容测试设备	146
8.1.1 LISN 与接收机	146
8.1.2 测试天线	147
8.2 电磁兼容测试场地	150
8.2.1 屏蔽室与屏蔽半暗室	150
8.2.2 TEM 及 GTEM 小室	152
8.3 电磁兼容标准与测试	157
8.3.1 标准的制定	157
8.3.2 国军标及测试方法简介	159
第 9 章 GTEM 小室的应用	161
9.1 电磁兼容测量	161
9.1.1 EMS 测量	161
9.1.2 辐射 EMI 测量	161
9.2 在天线和散射领域的测量	166
9.2.1 天线测量	166
9.2.2 电小尺寸散射体的 RCS 测量	167
9.3 在 RFID 领域的测量	169
9.3.1 读写距离测量	169
9.3.2 Delta RCS 测量	169
9.3.3 标签方向性的测量	171
参考文献	174

# 第1章 电磁兼容概述

## 1.1 电磁兼容学科概述

### 1.1.1 电磁兼容学科基本内容

随着科学技术的进步,人们已进入信息时代,当前人类的生存环境已具有浓厚的电磁兼容内涵,空间电磁能量密度与日俱增。严重恶化的电磁环境对人类生活日益依赖的通信、计算机、各种电子系统甚至人体健康造成越来越严重的威胁。为此世界各国均十分重视越来越复杂的电磁环境及电磁干扰、抗干扰技术的研究,从而促进了环境电磁学和电磁兼容技术成为一个迅速发展的学科。

按照国际电工联合会(IEC)的定义,电磁兼容是设备的一种能力,它在其电磁环境中能完成它的功能,而不至于在其环境中产生不允许的干扰。

电磁兼容(electromagnetic compatibility)一词,简称EMC,在20世纪40年代就已定义下来。20世纪20年代以来,世界各工业国家日益重视电磁干扰的研究,成立了许多相关的国际组织。1934年国际无线电干扰特别委员会(CISPR)成立,1944年德国电器工程师协会制定世界第一个电磁兼容规范,美国自1945年起颁布了一系列电磁兼容军用标准和设计规范,国际著名学术期刊IEEE射频频分册(RFI)从1964年改名为EMC分册,这些都是电磁兼容发展历史中的标志性事件。

20世纪60年代以来,电磁兼容学科获得空前的发展。我国对电磁兼容学科的研究在80年代开始起步,1990年举行了电磁兼容第一届全国学术会议。至今,越来越多的国家标准被制定,越来越多的部门建设了电磁兼容测试暗室,每年都有众多的电磁兼容学学术会议在国内外举办,这些都标志着电磁兼容学科已成为当今日益受到重视的学科。

电磁兼容学科的主要内容包括:

- (1) 电磁干扰源及耦合途径的理论研究;
- (2) 电磁频谱的利用和管理;
- (3) 电磁兼容工程分析及控制技术(屏蔽、接地、滤波、PCB等);
- (4) 电磁兼容设计与预测;
- (5) 电磁兼容测量技术;
- (6) 电磁兼容标准;
- (7) 信息泄露与防护技术(tempest);

- (8) 环境电磁脉冲及防护;
- (9) 电磁生物效应。

### 1.1.2 干扰源与耦合途径

导致电磁干扰现象的发生需同时存在三个因素: 干扰源、耦合途径和敏感设备, 统称为电磁兼容三要素。

干扰源是产生电磁干扰的源泉。干扰源包括天然和人为两种。来自天然的干扰源恐怕最常见和威胁最大的就是雷电, 另外, 地震和磁暴也是产生强烈电磁干扰的干扰源。

随着社会工业和信息技术的发展, 人为的干扰源成为更加需要重视的因素。广播、电视、各种通信台站、导航系统产生的电磁信号几乎充斥在空间和环境的每一个角落; 电力系统中的发电机、变压器、高压线, 工业系统中各种电动机、电焊机、加热器、控制器、搅拌机、继电器, 交通部门的电动机车、汽车点火装置, 都是强烈的干扰源; 办公中的计算机、键盘、打印机、复印机、日光灯, 各种家用电器如微波炉、风扇、吸尘器、冰箱比比皆是, 各种人为的电磁干扰源几乎无处不在。

军事上核电磁脉冲, 电子对抗中各式电子武器则属于强烈的人为干扰源。

设计和制造电子设备的工程师往往更为关心的是电子设备遇到的干扰源, 而这些干扰源往往在系统内产生。开关电源、脉冲数字线路、散热片、振荡器及各种电子线路都可能形成系统内干扰源, 同时也对系统外的空间产生电磁骚扰。

干扰源产生的电磁能量需要通过耦合途径才能传递到敏感设备, 工程师们要做的工作一个是如何使人为干扰源尽量地小, 另一个是切断干扰源与敏感设备间的耦合渠道。

耦合途径包括:

(1) 传导性耦合, 其中包括: ①直接传导耦合, 也可称为电路性耦合, 是通过导线和器件相连的传导性耦合; ②近场耦合, 是通过互感、互容等方式的耦合。

(2) 辐射耦合, 是通过电磁波传播的耦合, 亦称为远场耦合。

以上的分类方法并不是将通过空间的耦合都定义为辐射耦合。电感性耦合与电容性耦合尽管都是通过空间的耦合, 但仍然归类为传导性耦合。传导性耦合的共同特征是可用电路理论来分析, 而辐射耦合则不能。但无论辐射耦合还是传导耦合, 本质上都离不开场, 场才是电磁干扰和电磁耦合的根基。

### 1.1.3 电磁兼容分析方法的特点

(1) 电磁兼容是电磁场理论为基础的学科, 采取场与路结合的分析方法。

电磁干扰的本质是场的干扰, 所有的事情都是场的作用。尽管有些场合用电路理论来分析问题比由场来解决更方便, 但问题的本质还是场, 电路中导体的作用实

际上也是把源产生的场传送到其他元件中。电路理论很少论述结构的几何形状，而几何形状正是干扰现象的核心。

图 1.1 是一个通常遇到的简单例子。电池通过上下两根平行导线将能量传递给负载  $R_L$ ，最常用的方法是欧姆定律，但我们也可以以另一个观点看待这个问题。在上下两导线之间的空间中，电场与磁场的方向如图中所示。即使是直流电，坡印亭矢量的方向仍然是能流密度的方向， $\vec{E} \times \vec{H}$  的方向正是由电池指向负载，实际上负载得到的能量是由空间经过坡印亭矢量传递过来的，导线的作用仅仅是引导能量往负载方向传播。

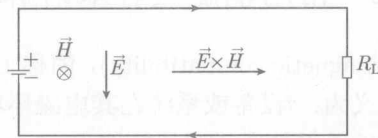


图 1.1 能量由两线之间的空间经坡印亭矢量传向负载

图 1.1 的情况在电路的分布参数不严重时可能用电路理论处理更方便，但实际上很多论题都不能用电路理论来对待，如雷电现象、天线辐射、趋肤效应、屏蔽效能等。图 1.2 就是一个例子，假设上下导体都是圆形导线，高频时电流集中在导线的外缘流动，这就是趋肤效应。如果分析一下导线两旁的场则很容易理解这个问题。假设导线不是理想导体，导线周围电场的切向分量则不为零，导线周围的切向电场与切向磁场沿图 1.2 所示的方向，由图可看出，导线边沿的坡印亭矢量都指向导体，表示场的能量由外面进入导体内部，并由强变弱地向导线的中心方向传播，形成了边缘电流密度强而中心电流密度弱的局面。如果纯粹用电路理论则无法解释这个现象。

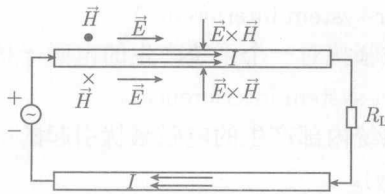


图 1.2 趋肤效应的物理图像

场是电磁干扰问题的本质，但实践中具体处理干扰问题，并不排除使用电路的理论。在很多情况下，可以将分布参数的效果等效为电路中的一个量，使用等效电路来处理，而不一定事事都去解复杂的场方程。因此，以电磁场理论为基础，场和路结合的分析方法是电磁兼容研究方法的一大特征。

(2) 电场与磁场的干扰要分清。

处理电磁干扰问题时,存在电场干扰和磁场干扰。电磁干扰的原理都不相同,不同性质的干扰需采取不同的解决方法,绝不能一概而论,这点在作电磁兼容分析时是一定要注意的。

(3) 电磁兼容研究的干扰在数值上往往存在很大尺度范围,作预测和测试时知道量级是主要的,而一般不要求非常高的精度。因而在电磁兼容领域,场或干扰电压都以 dB 作单位,以适应大跨度数值范围。

## 1.2 常用电磁兼容术语解释

(1) 电磁兼容 (electromagnetic compatibility), 简称 EMC。

国标对电磁兼容的定义为:“设备或系统在其电磁环境中能正常工作且不对该环境中的任何事物构成不能承受的电磁骚扰的能力。”

通俗地说,电磁兼容是设备的一种能力,它在其电磁环境中能完成它的功能,又不会在周围环境中产生不允许的电磁骚扰。

(2) 电磁骚扰 (electromagnetic disturbance)。

任何可能引起设备或系统性能下降,或对生命或无生命物质产生损害的电磁现象。空间的场、电路传递过来的干扰电压等,都称为电磁骚扰。

(3) 电磁干扰 (electromagnetic interference), 简称 EMI。

电磁骚扰引起的设备或系统性能下降的现象称为电磁干扰。或者说干扰是电磁骚扰作用到受害物体的过程或现象。

(4) 电磁敏感性 (electromagnetic susceptibility), 简称 EMS。

在存在电磁骚扰的情况下,设备或系统不能避免性能降低的能力。设备敏感度越高,表示其抗干扰能力越差。

(5) 系统间干扰 (inter-system interference)。

其他系统产生的电磁骚扰对一个系统产生的电磁干扰。

(6) 系统内干扰 (intra-system interference)。

系统中出现的由本系统内部产生的电磁骚扰引起的电磁干扰。

(7) 抗扰性 (immunity)。

设备或系统面临电磁骚扰不降低运行性能的能力。一个系统或设备的敏感性与抗扰性是相反的表达方式,敏感度高即抗扰度低。

(8) 电磁发射 (electromagnetic emission)。

从源向外发出电磁能量的现象。电磁发射包括了传导发射和辐射发射两种。

(9) 电磁辐射 (electromagnetic radiation)。

电磁能量以电磁波辐射的形式发射到空间的现象。

(10) 骚扰限值 (limit of disturbance)。

对应于规定测量方法的最大电磁骚扰允许电平。

(11) 抗扰性限值 (limit of immunity)。

规定的最小抗扰性电平。

(12) 电磁兼容电平 (electromagnetic compatibility level)。

预期加在工作于指定条件的装置、设备或系统上的规定的最大的电磁骚扰电平。

(13) 发射裕量 (emission margin)。

设备或系统的电磁兼容电平与发射限值之间的差值。

(14) 抗扰性裕量 (immunity margin)。

设备或系统的抗扰度限值与电磁兼容电平之间的差值。

图 1.3 表示了设备的发射限值、抗扰性限值和电磁兼容电平之间的相互关系。电磁兼容电平是按照预期电磁环境规定的一个值；发射限值、抗扰性限值是设备性能规定的值，它们与电磁兼容电平之差称为“裕量”。

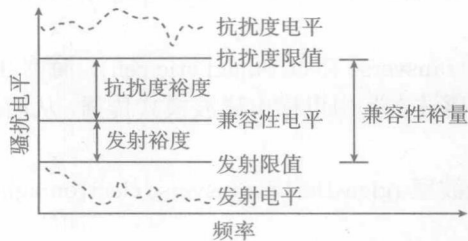


图 1.3 发射/抗扰性限值和电磁兼容电平之间的相互关系

(15) 耦合途径 (coupling path)。

电磁能量从干扰源到受害设备所经的途径，包括传导性耦合与辐射耦合。

(16) 地耦合干扰 (ground-coupled interference)。

电磁骚扰从一个电路通过公共地或地回路耦合到另一个电路从而引起的电磁干扰。

(17) 干扰抑制 (interference suppression)。

削弱或消除电磁骚扰的措施。

(18) 电磁屏蔽 (electromagnetic screen)。

用来减少电磁场向指定区域穿透的措施。屏蔽是通过阻止空间耦合的手段抑制电磁骚扰，抑制的电磁场包括远场和近场。

(19) 人工电源网络 (artificial mains network)，又称线路阻抗稳定网络 (line impedance stabilization network)，简称 LISN。



串接在被测设备电源进线处的网络。它是进行电磁兼容传导性测试的基本设备,其作用是为骚扰电压的测量提供规定的负载阻抗,并使被测设备与电源相互隔离。

(20) 差模电压 (differential mode voltage)。

一组规定的带电导体任意两根之间的电压。

(21) 共模电压 (common mode voltage)。

每个导体与规定参考点 (通常是机壳或地) 之间的电压。

(22) 准峰值检波器 (quasi-peak detector)。

一种具有规定的电气时间常数的检波器。当施加规则的重复等幅脉冲时,输出电压是脉冲峰值的分数,且此分数随脉冲重复率增加趋于 1。

(23) 峰值检波器 (peak detector)。

输出电压为所施加信号峰值的检波器。

(24) 测试场地 (test site)。

在规定条件下能满足对被测设备的电磁发射进行正确测试的场地。例如,屏蔽室、开阔场、电磁兼容半暗室、TEM 与 GTEM 小室等,都是规定的电磁兼容测试场地。

(25) 横电磁波室 (transverse electromagnetic cell), 简称 TEM 小室。

一个封闭系统,电磁波在其中以横电磁波模式传播,从而产生供测试使用规定的电磁场的设备。

(26) 吉赫兹横电磁波室 (giga-Hertz transverse electromagnetic cell), 简称 GTEM 小室。

一种可工作于吉赫兹频段的横电磁波室。

(27) 电磁屏蔽半电波暗室 (electromagnetic shielded semi-anechoic chamber)。

一种六面有屏蔽体,五面有吸波材料的电磁暗室,用于模拟开阔场进行电磁兼容测试。



## 第 2 章 电磁辐射与远近场的基本概念

### 2.1 电、磁偶极天线与电磁对偶原理

#### 2.1.1 电偶极天线的场

图 2.1 所示为电偶极天线的基本模型。两根分开的导体形成电偶极的两臂，如果在中央给其馈电，则两臂流有相同方向的电流。设两臂的总长为  $l$ ，如果抛开馈电问题不管，电偶极天线在空间产生的场与一根长为  $l$  的线电流产生的场是一样的。因此，在分析电磁兼容问题时，遇到有其他方式产生的线电流，我们仍然可以用电偶极天线的场公式进行分析和计算。但电偶极天线一般定义为其长度跟波长相比很短，如果天线很长，则称为线天线。

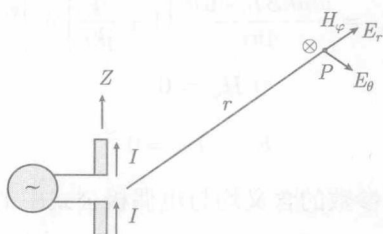


图 2.1 电偶极天线的基本模型及产生的场

设电偶极天线电流为  $I_0$ ，全长为  $l$ ，在以电偶极中央为原点的球坐标系中，其产生的场为

$$E_r = \eta \frac{I_0 l \cos \theta}{2\pi r^2} \left[ 1 + \frac{1}{jkr} \right] e^{-jkr} \quad (2.1a)$$

$$E_\theta = j\omega\mu \frac{I_0 l \sin \theta}{4\pi r} \left[ 1 + \frac{1}{jkr} - \frac{1}{(kr)^2} \right] e^{-jkr} \quad (2.1b)$$

$$H_\phi = j \frac{k I_0 l \sin \theta}{4\pi r} \left[ 1 + \frac{1}{jkr} \right] e^{-jkr} \quad (2.1c)$$

$$E_\phi = 0 \quad (2.1d)$$

$$H_r = H_\theta = 0 \quad (2.1e)$$

式中， $r, \theta$  为球坐标参数； $\mu$  为周围空间介质的磁导率，如果介质为空气，则  $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ ； $k$  是介质中的波数，在无损耗介质中与波长  $\lambda$  的关系为  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ； $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$