

<http://www.phei.com.cn>

电磁兼容测试方法 与工程应用

赵 阳 封志明 黄学军 等著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

电磁兼容测试方法与 工程应用

赵 阳 封志明 黄学军 等著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

随着电气与电子技术的飞跃发展,产品的电磁兼容(EMC)性正受到越来越多的电子、电气工程师和广大工程技术人员的关注和重视。本书共有8章,分为电磁兼容基本原理与测试标准、电磁兼容测试仪器原理与方法和电磁兼容测试案例与分析3篇,主要内容包括:电磁兼容基础、电磁抗干扰测试仪器与测试方法、传导电磁干扰(EMI)测试仪器与测试方法、辐射电磁干扰噪声测试仪器与测试方法、电磁抗扰度(EMS)测试设计方案与应用实例、传导EMI噪声测试方案与应用实例、辐射EMI噪声测试方案与应用实例,以及盲源分离在EMI噪声测量中的应用等。

本书可作为高校电气与电子类专业的研究生教材,也可作为相关科研人员、电气与电子工程师进行EMC培训和学习的参考资料。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容测试方法与工程应用/赵阳等著. —北京:电子工业出版社,2010.4
ISBN 978-7-121-10532-6

I. 电… II. 赵… III. 电磁兼容性-测试技术 IV. TN03

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第043835号

策划编辑:苏颖杰

责任编辑:雷洪勤

印 刷:北京东光印刷厂

装 订:三河市皇庄路通装订厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:13 字数:333千字

印 次:2010年4月第1次印刷

印 数:4000册 定价:32.00元

凡所购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

本书由以下基金和项目资助出版：

- ◆ 江苏省自然科学基金 BK2008429
- ◆ 毫米波国家重点实验室基金 K200803, K200903
- ◆ 教育部双语示范建设项目“电磁兼容基础”
- ◆ 南师大优秀教学团队建设项目
- ◆ 中国博士后基金 20080431126

前 言

电磁兼容学科与多门学科相互渗透、结合，是自然科学和工程学的一个综合性交叉学科，其理论基础宽广，工程实践强，也是电力、电子和其他相关从业工程师必须掌握的基础知识和技术。

随着电气与电子技术的飞跃发展，产品的电磁兼容（EMC）性及测试方法正受到越来越多的电子、电气工程师和工程技术人员关注和重视。为了满足标准测试的要求，保障设备的稳定性与可靠性，设计人员必须对系统进行完备的 EMC 测试与设计。

本书分为电磁兼容的基本原理与测试标准、电磁兼容测试仪器原理与方法和电磁兼容测试案例与分析 3 篇，主要内容包括：电磁兼容基础、电磁抗干扰测试仪器与测试方法、传导电磁干扰（EMI）测试仪器与测试方法、辐射电磁干扰噪声测试仪器与测试方法、电磁抗扰度（EMS）测试设计方案与应用实例、传导 EMI 噪声测试方案与应用实例、辐射 EMI 噪声测试方案与应用实例，以及盲源分离在 EMI 噪声测量中的应用等。

本书有以下几个特色：

（1）应用了最新的电磁兼容测试方法。

（2）列举了大量最新实际案例。

（3）结合了作者最新的研究成果。

（4）产学研结合，在运用常规的 EMC 测量方法无法解决的场合引入测试新技术，可操作性强，理论可靠，技术可行。

本书从实际工作需要出发，结合了电类专业特点，覆盖面广，内容由浅入深，具有较强的实用性和可选性。本书旨在让专业人士对电磁兼容测试有一个全面而具体的认识，图文并茂，浅显易懂；同时也适于其他相关专业技术人员参考阅读。书中提出的测试方法简单易行，适宜于工程应用，是多位作者历年来实践得出的结果。

本书由南京师范大学赵阳教授、江苏省计量科学研究院副院长封志明、苏州泰思特电子科技有限公司黄学军先生承担主要编写工作，其中，赵阳教授编写了第 1、3 章，并负责全书编写的组织工作及统稿，封志明副院长编写了第 2、5 章和第 4、6、7 章的部分内容，并负责全书的整理和统稿；苏州泰思特电子科技有限公司黄学军先生、江苏省计量科学研究院赵波博士、南京邮电大学邱晓晖副教授、南京师范大学李世锦老师以及煤炭科学

院重庆研究院 EMC 实验室主任石发强编写了本书的其他章节。

在本书编写过程中，颜伟、罗永超、陆婉泉、董颖华和戎融等研究生做了大量的文字输入和校对工作，在此表示感谢。

在本书完稿之际，对书中参考文献的作者一并表示感谢。

由于作者时间仓促，水平有限，书中难免有不当或错误之处，敬请广大读者批评指正。

全体作者于南京

目 录

第 1 篇 电磁兼容的基本原理与测试标准

第 1 章 电磁兼容基础	1
1.1 电磁兼容的概念与分析方法	1
1.1.1 电磁兼容工程基本概念与术语	1
1.1.2 电磁兼容性分析方法	3
1.2 电磁兼容测量标准	4
1.2.1 基础标准	4
1.2.2 通用标准	4
1.2.3 产品族标准	5
1.2.4 专用产品标准	5
1.3 电磁兼容测量预备知识	5
1.3.1 常用电磁兼容测量单位	5
1.3.2 电磁场辐射的基础知识	7
1.3.3 噪声信号	11

第 2 篇 电磁兼容测试仪器原理与方法

第 2 章 电磁抗干扰测试仪器与测试方法	14
2.1 传导抗扰度 EMS 测试系统及测试方法	14
2.1.1 电快速瞬变脉冲群 (EFT) 发生器及测试方法	14
2.1.2 雷击、浪涌发生器及测试方法	18
2.2 辐射抗扰度 EMS 测试系统及测试方法	22
2.2.1 基于 GTEM 室的辐射抗扰度 (RS) 测试系统及测试方法	22
2.2.2 基于电波暗室的辐射抗扰度 (RS) 测试系统及测试方法	31
2.3 静电放电 (ESD) 发生器及测试方法	32
第 3 章 传导电磁干扰 (EMI) 测试仪器与测试方法	37
3.1 传导性电磁干扰测试仪器	37
3.1.1 线性阻抗稳定网络 (LISN)	37
3.1.2 传导噪声接收仪器	39
3.1.3 传导干扰诊断仪器	40
3.1.4 传导干扰抑制设备	40

3.2	传导 EMI 标准测试方法	43
3.2.1	电源线上传导干扰电压的测量方法	43
3.2.2	常用产品族标准对电源线传导骚扰电压的限值	47
3.3	传导 EMI 分析中的噪声测试方法	50
3.3.1	传导噪声模态分离基本原理	50
3.3.2	传导噪声模态分离测试方法	50
3.3.3	传导电磁干扰测量方法	53
3.4	噪声分离网络特性的测试方法	53
3.4.1	噪声分离网络的性能指标	53
3.4.2	噪声分离网络特性测试方法	54
3.5	噪声源内阻抗测试方法	55
3.5.1	基于双电流探头法的噪声源内阻抗测试	55
3.5.2	基于单电流探头法的噪声源内阻抗测试	58
3.5.3	基于散射参数法的噪声源内阻抗测试	60
3.5.4	基于插入损耗法的噪声源内阻抗测试	62
3.6	传导电磁干扰综合解决方案	63
3.6.1	系统硬件设计	64
3.6.2	系统软件设计	65
3.6.3	传导 EMI 噪声综合解决方案的经济一体化建模	66
3.7	传导噪声机理分析方法	68
3.7.1	开关电源设计	68
3.7.2	控制电路与控制芯片的选择	70
3.7.3	开关电源传导 EMI 噪声源理论分析	71
第 4 章	辐射电磁干扰噪声测试仪器与测试方法	74
4.1	辐射电磁干扰测试仪器	74
4.1.1	吉赫兹横电磁波传输小室 (GTEM)	74
4.1.2	电波暗室	77
4.1.3	电场/磁场探头	79
4.2	辐射电磁干扰标准测试	80
4.3	基于近场环境的辐射 EMI 测试方法	83
4.4	基于射频电路参数的辐射 EMI 测试原理与方法	87
4.4.1	基于射频电流探头的辐射 EMI 测试原理与方法	87
4.4.2	基于射频电压探头的辐射 EMI 测试原理与方法	90

第 3 篇 电磁兼容测试案例分析

第 5 章	电磁抗扰度 (EMS) 测试设计方案与应用实例	92
5.1	静电放电 (ESD) 发生器方案与分析	92
5.2	传导抗扰度 EMS 测试案例分析	96

5.2.1	电快速瞬变脉冲群 (EFT) 的测试方案与应用实例	96
5.2.2	雷击、浪涌发生器的测试方案与应用实例	98
5.3	辐射 EMS 测试案例与分析	102
第 6 章	传导 EMI 噪声测试方案与应用实例	108
6.1	传导 EMI 噪声分离网络与应用案例	108
6.1.1	分离网络特性测试案例	108
6.1.2	高性能分离网络研制与应用案例	114
6.1.3	传导噪声诊断与抑制应用	121
6.2	电力电子中的传导噪声源测试案例	125
6.2.1	基于电流探头法的噪声源内阻抗建模案例	125
6.2.2	基于插入损耗法的噪声源内阻抗建模案例	129
6.2.3	基于散射参数法的噪声源内阻抗建模案例	130
6.3	传导电力电子干扰噪声源产生机理诊断测试案例	132
6.3.1	噪声源驱动信号对传导 EMI 噪声的影响	132
6.3.2	噪声源负载对传导 EMI 噪声的影响	133
6.3.3	开关管耦合电容对传导 EMI 噪声的影响	134
6.4	传导干扰噪声诊断与抑制综合装置应用案例	135
第 7 章	辐射 EMI 噪声测试方案与应用实例	141
7.1	辐射 EMI 噪声诊断案例	141
7.1.1	案例一: 基于近场电磁场测试的数字电路板辐射 EMI 噪声诊断	141
7.1.2	案例二: 基于近场电磁场测量的无线扩音器辐射 EMI 噪声诊断	146
7.1.3	案例三: 基于射频电流探头测量的辐射 EMI 噪声诊断	148
7.1.4	案例四: 基于射频电压探头测量的辐射 EMI 噪声诊断	150
7.1.5	案例五: 基于无线通信设备的辐射机理快速诊断	152
7.2	辐射 EMI 噪声预估案例	156
7.2.1	案例一: 基于射频电流探头的高频数字电路辐射 EMI 噪声预估	157
7.2.2	案例二: 基于射频电压探头的高频数字电路辐射 EMI 噪声预估	160
7.3	电力线载波通信 (PLC) 的辐射 EMI 分析应用案例	163
7.3.1	案例一: 电力线载波通信的辐射 EMI 噪声诊断	164
7.3.2	案例二: 电力线载波通信的辐射 EMI 噪声预估	166
7.3.3	案例三: 基于共模滤波器的电力线载波通信辐射 EMI 噪声抑制	169
7.3.4	案例四: 基于铁氧体磁环的电力线载波通信辐射 EMI 噪声抑制	171
第 8 章	盲源分离在 EMI 噪声测量中的应用	175
8.1	盲源分离 (BSS) 算法原理	175
8.2	模式识别方法	177
8.3	基于 BSS 原理的 EMI 噪声可分离性分析	180
8.4	应用案例	189

第 1 篇 电磁兼容的基本原理 与测试标准

第 1 章 电磁兼容基础

1.1 电磁兼容的概念与分析方法

1.1.1 电磁兼容工程基本概念与术语

1. 电磁兼容概念

(1) 电磁干扰

电磁干扰是“电磁骚扰引起的设备、传输通道或系统性能的下降”。电磁骚扰仅是电磁现象，它可能引起设备性能的降级或损害，但不一定已经形成后果。而电磁干扰是由电磁骚扰引起的后果。通常人们在分析电磁干扰问题时常常与电磁骚扰联系在一起讨论，或统称为电磁干扰。

(2) 电磁干扰源的分类

电磁干扰的分类可以有多种分法。例如，按传播途径分，有传导干扰和辐射干扰，其中传导干扰的传输性质有电耦合、磁耦合及电磁耦合；按辐射干扰的传输性质分，有近场区感应耦合和远场区辐射耦合；按频带分，有窄带干扰和宽带干扰；按干扰频率范围分，可细分为 5 种；按实施干扰者的主观意向分，可分为有意干扰源和无意干扰源；按干扰源性质分，有自然干扰和人为干扰。

(3) 电磁干扰的三要素

所有的电磁干扰都是由 3 个基本要素组合产生的，它们是：电磁干扰源；对该干扰能量敏感的设备；将电磁干扰源传输到敏感设备的媒介，即传输通道或耦合途径（如图 1-1 所示）。

相应地对抑制所有电磁干扰的方法也应从这三要素着手解决。

① 电磁干扰源：指产生电磁干扰的任何元件、器件、设备、系统或自然现象。

② 耦合途经（或称传输通道）：指将电磁干扰能量传输到受干扰设备的通道或媒介。

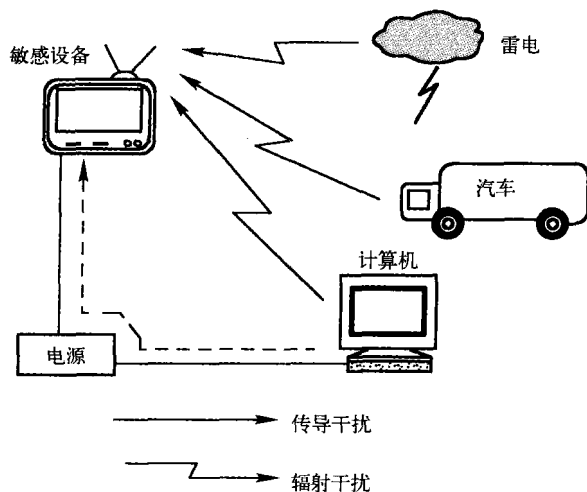


图 1-1 电磁干扰源作用于敏感设备的耦合途径

③ 敏感设备：指受到电磁干扰影响，或者说对电磁干扰发生响应的设备。

(4) 电磁兼容的含义

电磁兼容 (Electromagnetic Compatibility, EMC) 一般指电气及电子设备在共同的电磁环境中能执行各自功能的共存状态，即要求在同一电磁环境中的上述各种设备都能正常工作又互不干扰，达到“兼容”状态。换句话说，电磁兼容是指电子线路、设备、系统相互不影响，并且从电磁角度具有相容性的状态。相容性包括设备内电路模块之间的相容性、设备之间的相容性。进一步讲，电磁兼容学是研究在有限的空间、有限的时间、有限的频谱资源条件下，各种用电设备或系统（广义的还包括生物体）可以共存并不致引起性能降级的一门学科。电磁兼容的理论基础涉及数学、电磁场理论、电路基础、信号分析等学科与技术，其应用范围又几乎涉及所有用电领域。在电磁兼容领域中，我们所面对的研究对象（主要指电磁噪声）无论是时域特性还是频域特性都十分复杂。此外，研究对象的频谱范围非常宽，使得电路中的集中参数与分布参数同时存在，近场与远场同时存在，传导与辐射同时存在，为了在国际上对这些物理现象有统一的评价标准和统一实现设备或系统电磁兼容的技术要求，对测量设备与设施的特性以及测量方法等均予以严格的规定，并制定了大量的技术标准。

2. 电磁兼容与电磁干扰主要术语

带宽 (Bandwidth)：一个接收机响应信号的上升 3dB 点和下降 3dB 点之间的频率间隔。

共模 (Common Mode, CM)：存在于两根或多根导线中，流经所有导线的电流都是同极性的。

共模抑制比 (Common-mode Rejection Ratio, CMRR)：衡量运算放大器对共模电压抑制能力的参数。

耦合路径 (Coupling Path)：传导或辐射路径。干扰能量通过该路径从干扰源传输到

被干扰对象。

串扰（串音）（Crosstalk）：被干扰电缆上从邻近干扰源电缆耦合的电压与该邻近电缆上的电压之比。单位为分贝（dB）。

差模（Differential Mode, DM）：在导线对上极性相反的电压或电流。

电磁兼容（Electromagnetic Compatibility, EMC）：是一种条件，在此条件下一组中的几台设备互相不干扰也不干扰它们所处的环境。

电磁干扰（Electromagnetic Interference, EMI）：与电磁兼容恰恰相反。

远场区（Far Field）：即指信号源距测量点有 $1/6$ 波长以上的辐射场，也称为平面波。

近场区（Near Field）：在此辐射场中，与电磁干扰源的距离小于 $1/6$ 波长的域。

灵敏度（Sensitivity）：当模拟电路中的噪声为有限带宽白噪声时，当 $S = N$ 时对应的输入信号值。该值以下，电路没有响应信号输出，或其输出信号可忽略。

1.1.2 电磁兼容性分析方法

按其发展过程，电磁兼容性的分析方法通常分为 3 种：即问题解决法、规范法和系统法。

1. 问题解决法

问题解决法是解决电磁兼容问题的早期方法，首先按常规设计建立系统，然后再对现场实验中出现的电磁干扰问题设法予以解决。由于系统已安装完工，要解决电磁干扰问题比较困难，为了解决问题可能需要进行大量的拆卸，甚至要重新设计。对于大规模集成电路，可能会严重地破坏其电路板。因此，问题解决法是一种非常冒险的方法，而且这种头痛医头、脚痛医脚的方法不能从根本上解决电磁干扰问题。

2. 规范法

规范法比问题解决法更为合理的一种方法，该方法是按现行电磁兼容标准（国家标准或军用标准）所规定的极限值来进行计算，使组成系统的每个设备或子系统均符合所规定的标准，并按标准所规定的试验设备和实验方法核实它们与规范中规定极限值的一致性。该方法可在系统实验前对系统的电磁兼容提供一些预见性。其主要缺点在于既有可能过设计，同时谋求解决的问题又不一定是真正存在的问题。

3. 系统法

系统法是近几年兴起的一种设计方法，它在产品的初始设计阶段对产品的每一个可能影响产品电磁兼容性的元器件、模块及线路建立了数学模型，利用计算机辅助设计工具对其电磁兼容性进行分析预测和控制分配，从而为整个产品打下良好的基础。这种方法通常在正式产品完成之前就解决了 90% 的电磁兼容问题。

1.2 电磁兼容测量标准

国际上有多个标准化组织设计电磁兼容领域的研究，同时制定和发布有关电磁兼容测试标准。设计电磁兼容的国际标准化组织主要是国际电工委员会（IEC），其中，国际无线电干扰特别委员会（CISPR）和 IEC 第 77 技术委员会（IEC/TC77）是制定电磁兼容基础标准和产品标准的两大组织。我国的电磁兼容标准绝大多数采纳这类国际标准。

由 IEC/TC77、CISPR 和/或其他（区域）标准化组织制定的电磁兼容标准一般采用 IEC 的标准分类方法，把相关标准分为 3 类或 4 类：基础标准、通用标准、产品标准（又分为产品族标准和专用产品标准）。每类标准都分为发射和抗扰度两个方面。

1.2.1 基础标准

基础标准（Basic Standards）规定了达到电磁兼容性的一般和基本的条件或规则，与涉及电磁兼容问题的所有产品、系统或设施有关，并可适用于这些产品，但不规定产品的发射限值或抗扰度评判准则。基础标准是制定通用标准、产品标准的引用文件。

基础标准内容包括：术语、现象、环境特征、测量试验技术和方法、试验仪器和基本试验装置，也可以规定不同的试验等级以及相应的试验电平。基础标准如：CISPR16 系列标准、IEC 61000-4 系列标准等。

1.2.2 通用标准

通用标准（Generic Standards）规定了一系列的标准化试验方法与要求、限值，并指出这些方法和要求所适用的环境。通用标准规定产品的发射限值或抗扰度评判准则。如果某种产品没有产品族标准或专用产品标准，则可以使用通用标准。通用标准必须参考基础标准，因为其不包含详细的测量试验方法和设备。必要时也可能包括一些附加信息，如选择某基础标准中所使用的某项测量试验方法。

通用标准将所适用的环境分为 A、B 两大类。A 类指工业环境，包括：工科医（ISM）射频设备所在的环境、频繁开关大的感性负载或容性负载的环境、大电流并伴有强磁场的环境，A 类通用标准如：IEC 61000-6-2/4。B 类环境值居住、商业和轻工业环境，包括：居住环境，如住宅、公寓等居住环境；商业环境，如商业零售网点、商业大楼、公共娱乐场所、户外场所（如加油站、停车场、体育场等）。B 类通用标准如：IEC 61000-6-1/3。

1.2.3 产品族标准

产品族标准 (Product Family Standards) 针对特定的产品类别, 规定了专门的电磁兼容发射限值或抗扰度评判准则以及详细的测量试验程序。产品族标准比通用标准包含更多的特殊性和详细的性能要求以及产品运行条件等。该类标准应采用基础标准规定的测量试验方法, 其发射限值或抗扰度评判准则必须与通用标准互相协调, 如果存在偏差的, 应说明其必要性和合理性, 必要时可增加测量试验项目。系列产品标准应比通用标准优先采用。

产品族是指一组类似的产品、系统或设施, 对于它们可以采用相同的电磁兼容标准, 例如, 电信设备、音视频设备、信息技术设备等。产品族可以包括不同功能的产品, 但必须具有某些共同的一般特性。产品族标准如 CISPR22 《信息技术设备的无线电骚扰限值和测量方法》。

1.2.4 专用产品标准

专用产品标准 (Dedicated Product Standards) 是关于特定产品、系统或设施而制定的电磁兼容标准, 根据这些产品特性必须考虑一些特殊的条件, 其采用的规则和产品族标准相同。专用产品标准应比产品族标准优先采用。

专用产品标准抗扰度要求必须考虑产品的专门功能特性, 制定更精确的性能判定准则, 所以专用产品标准与系列标准或通用标准有差异是合理的。由于产品族划分的范围可宽可窄, 有时不一定能精确划分出产品族和专用产品的界限。

1.3 电磁兼容测量预备知识

1.3.1 常用电磁兼容测量单位

EMC 问题中主要的量包括: 传导发射电压, 以伏 (V) 为单位; 电流, 以安培 (A) 为单位; 辐射发射电场, 以伏每米 (V/m) 为单位; 磁场, 以安培每米 (A/m) 为单位。与这些主要量相联系的就是功率 [以瓦特 (W) 为单位] 和功率密度 (以 W/m^2 为单位)。这些量的取值范围相当大。例如, 电场值可以从 $1\mu V/m \sim 200V/m$ 。这意味着其幅值的动态范围达到了 8 个数量级 (10^8)。因为在 EMC 领域中以这些单位表示量的宽范围是很常见的, 所以 EMC 单位用分贝 (dB) 来表示。分贝有压缩数据的特点, 如 10^8 的电压范围是 160dB。为了在 EMC 领域中有效, 必须能够表达并且熟练使用这些用 dB 来表示的单位。当各量值以 dB 为单位来表示时, 使各种不同的 EMC 单位概念化也很重要。下面以图 1-2 所示的放大器电路为例来说明如何用 dB 来表示各值。

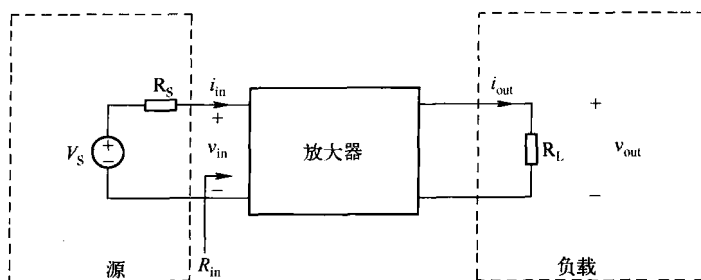


图 1-2 分贝 (dB) 的定义和使用举例说明

以 dB 表示的功率增益定义为

$$\text{dB} \equiv 10 \lg \left(\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \right)$$

用 dB 为单位定义电压增益和电流增益

电压增益:

$$\text{dB} \equiv 20 \lg \left(\frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} \right)$$

电流增益:

$$\text{dB} \equiv 20 \lg \left(\frac{i_{\text{out}}}{i_{\text{in}}} \right)$$

总之, 以 dB 为单位的两个量的比值由以下各式给出

$$\text{dB} \equiv 10 \lg \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (\text{功率}) \quad (1-1)$$

$$\text{dB} \equiv 20 \lg \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \quad (\text{电压}) \quad (1-2)$$

$$\text{dB} \equiv 20 \lg \left(\frac{i_2}{i_1} \right) \quad (\text{电流}) \quad (1-3)$$

注意, 分贝 (dB) 是两个量的比值。绝对功率、电压或者电流以 dB 来表示时是以相同的单位量为参考的。例如, 电压通常相对于 $1\mu\text{V}$ 表示为 $\text{dB}\mu\text{V}$:

$$\text{dB}\mu\text{V} \equiv 20 \lg \left(\frac{V}{1\mu\text{V}} \right) \quad (1-4)$$

功率也可以用 dBmW (高于 1mW 的 dB 数) 来表示, 更常用 dBm 来表示。如

$$\text{dBm} \equiv \text{dBmW} \equiv 10 \lg \left(\frac{W}{1\text{mW}} \right) \quad (1-5)$$

注意单位命名的方式都遵循电流和电压的单位名称。

1.3.2 电磁场辐射的基础知识

1. 辐射概念

众所周知，电磁场以一定的速度传播，叫做电磁波。理论和实验证明：电场和磁场从源开始，可以在空间中传播很远，这种现象被称为电磁辐射。某点电磁场取决于该点到源的距离，在近场区域，主要是感应场。它的能量可以在电磁场和源之间转移，也可以在源和周围空间之间转移。在远场，主要是辐射场，空间传播的能量不能够转移反馈到源。

部分关于电磁辐射公式：

$$\lambda = \frac{c}{f} \text{ 或 } \lambda = \frac{V}{f}, \beta = \frac{2\pi}{\lambda}$$

式中， c ——光速；

f ——电磁波频率；

λ ——波长；

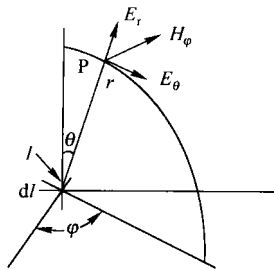
β ——相位传播常数。

2. 偶极子辐射场

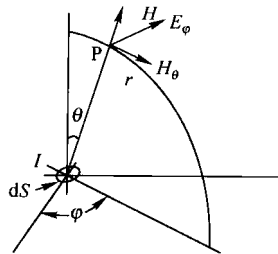
(1) 电偶极子辐射场

如图 1-3 (a) 所示为偶极子产生的辐射场。展示了小直流元 Idl ($dl \ll \lambda$) 的矢量磁势为：

$$\mathbf{A} = e_z \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I e^{-jkr}}{r} dz = A_z$$



(a) 短直导线源



(b) 小环形电流源

图 1-3 偶极子产生的辐射场

依据

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A}$$

因此

$$H_\phi = \frac{Idlk^2}{4\pi} \cdot \left[j \frac{-1}{(kr)} + \frac{1}{(kr)^2} \right] \sin\theta e^{-jkr}$$

$$H_r = H_\theta = 0 \quad (1-6)$$

且

$$\mathbf{E} = \frac{1}{j\omega\epsilon} \nabla \times \mathbf{H}$$

综上

$$\begin{aligned} E_\theta &= \frac{Idlk^3}{4\pi\omega\epsilon_0} \left[\frac{-1}{j(kr)} + \frac{1}{(kr)^2} + \frac{1}{j(kr)^3} \right] \sin\theta e^{-jkr} \\ E_r &= \frac{Idlk^3}{2\pi\omega\epsilon_0} \left[\frac{1}{(kr)^2} + \frac{1}{j(kr)^3} \right] \cos\theta e^{-jkr} \\ E_\varphi &= 0 \end{aligned} \quad (1-7)$$

(2) 磁偶极子辐射场

根据互惠原则, $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{H}$ 可等价

$$Idl \rightarrow -j\omega\epsilon_0 IdS$$

$$\mathbf{E} \rightarrow \mathbf{H}$$

$$\mathbf{H} \rightarrow -\mathbf{E}$$

$$\epsilon_0 \rightarrow \mu_0$$

$$\mu_0 \rightarrow \epsilon_0$$

因此

$$(1-8)$$

$$\begin{aligned} H_\theta &= \frac{IdSk^3}{4\pi_0} \left[\frac{-1}{kr} - \frac{1}{j(kr)^2} + \frac{1}{(kr)^3} \right] \sin\theta e^{-jkr} \\ H_r &= \frac{IdSk^3}{2\pi} \left[\frac{-1}{j(kr)^2} + \frac{1}{(kr)^3} \right] \cos\theta e^{-jkr} \\ E_\varphi &= \frac{IdSk^2}{4\pi\omega\epsilon_0} \left[\frac{1}{(kr)} + \frac{1}{j(kr)^2} \right] \sin\theta e^{-jkr} \\ H_\varphi &= E_\theta = E_r = 0 \end{aligned}$$

k 是电磁波常数, 等于 $2\pi/\lambda$ 。

(3) 偶极子辐射场分析总结

情况 1: 在远场, 辐射占主导地位, $kr \gg 1$ (或 $r \gg \lambda/2\pi$)。

对电偶极子

$$E = E_\theta \approx \frac{jIdlk^2}{4\pi\omega\epsilon_0 r} \sin\theta e^{-jkr}$$