

电磁兼容技术系列



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

电磁兼容

技术之产品研发与认证

杨继深 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

电磁兼容技术系列

电磁兼容技术 之产品研发与认证

杨继深 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

随着电子线路和电子设备的日益复杂化,以及电磁兼容标准(军用品和民用品)的强制实施,电磁兼容技术已经成为电子产品硬件设计人员必须掌握的基本技术之一。本书主要介绍电磁兼容要求(GJB151A)、试验及相关的基本概念;地线干扰问题产生的机理及解决方案,地线设计方法;电磁屏蔽的原理、屏蔽材料的选用、实际屏蔽体的设计等。根据工程师的特点,注重物理概念的讲解,避免冗长的数学推导,与实际工程相结合,通过实际例子讲解概念的应用。不仅使学习者掌握有关的知识,而且注重解决实际工程问题能力的培养。

读者对象为产品设计、开发及系统工程师,也可作为相关培训的教材。

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

电磁兼容技术之产品研发与认证/杨继深编著. —北京:电子工业出版社, 2004.6

(电磁兼容技术系列)

ISBN 7-120-00079-9

I. 电… II. 杨… III. ①电磁兼容性—电子产品—技术开发 ②电磁兼容性—电子产品—认证
IV. F407.636.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 049756 号

责任编辑:张 榕 (zr@phei.com.cn)

印 刷:北京市天竺颖华印刷厂

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

经 销:各地新华书店

开 本:787×980 1/16 印张:17.25 字数:441.6 千字

印 次:2004 年 6 月第 1 次印刷

印 数:5 000 册 定价:26.00 元

凡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。联系电话:(010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

前言

电子技术的高速发展和电子产品的广泛应用是当今时代的一个重要特征。随着电子线路和电子设备的广泛应用,电磁兼容问题越来越突出。在电子设备和系统的设计中,电磁兼容设计已经具有与功能设计同样的重要性。

由于电磁兼容这门课程很少在大学课程中出现,因此电子工程师需要对这方面技术有更多的了解,以解决实际工程中出现的各种电磁干扰问题,并消除对电磁兼容技术的神秘感。曾经有一个工程师遇到这样一个“奇怪”的问题,在有用的脉冲信号上出现了一串上升沿很陡、脉宽很窄的干扰脉冲信号,他用尽了各种低通滤波电路来滤除这一串干扰脉冲,直到有用信号已经由于上升沿过缓而无法使用了,干扰信号却几乎没有衰减。他用软件对所使用的滤波电路进行仿真,却发现干扰信号被软件滤波器滤除得十分干净。对此,他十分困惑。实际上,这是一个十分简单的电磁兼容问题,他没有注意实际中低通滤波器的高频性能下降问题,这在本书第4章做了详细的论述。

作者在从事军用计算机系统的开发中体会到掌握电磁兼容技术的重要性和困难性,感到为电子工程师们提供一个便于理解和实用的培训课程十分必要。为此,作者从1996年开始探索面向电子工程师的电磁兼容技术培训工作,并主持了名为“实践电磁兼容技术”的培训课程。这门课程之所以称为实践电磁兼容技术,是因为它的目标是使参加培训的工程师能够将所学习的内容马上应用到实际工作中。经过几年的努力,“实践电磁兼容技术”这门课程趋于成熟,培训班上发给学员的授课讲义已经成为许多人工作中的重要参考资料,一些公司将授课讲义作为新职工的内训教材。

实践电磁兼容课程在后来几年(2000年以后)的培训中受到学员的极大好评,很多学员希望尽快将授课讲义整理成书,以便课后复习和在工作中参考。本来想再通过一段时间的培训实践,在广泛探求学员需求的基础上,使内容更加完整、实用后再整理成书。但2003年8月,电子工业出版社的张榕编辑找到我,陈述了社会上对此类图书的迫切需求,并鼓励我先将目前的授课讲义整理出版。至此,我受到鼓舞,将培训课程的授课讲义整理成书。

本书在内容编写上特别注意以下两点:

(1) 尽量使内容与工程实践相结合,既论述到工程中所涉及的各个方面,也尽量避免对实际工作指导意义不大的陈述,以节省读者的宝贵时间,不致分散读者的注意力。如前所述,本书是多年对工程技术人员培训的成果,因此在这方面有独特的条件。

(2) 注重对物理概念的讲解,尽量避免冗长的公式推导。在实际工作中,经常发

生设计人员错误套用公式进行计算，或者在用软件工具进行分析时不能正确建立模型的现象，其根本原因在于对物理概念理解不清。现在市场上的电磁兼容分析软件产品很多，可把工程人员从烦琐的计算中解放出来，而更重要的则是建立准确的物理概念，才能用好这些工具。

电磁兼容技术本身并不复杂，而现实中的电磁干扰现象却千差万别，因此解决电磁兼容问题并不是件容易的事，需要长期的实践和经验的积累。而许多读者都希望能从书中直接找到解决问题的答案，特别是关于如何使所开发的产品顺利通过电磁兼容试验方面的知识。为了满足这种愿望，本书的最后一章专门针对一些常见的试验给出了相关的解决方案，特别是如何顺利通过这些试验的设计方法。通过这种编排，希望本书不仅能培养工程技术人员解决电磁干扰问题的能力，而且能对其工作起到直接的指导作用。

本书能顺利出版，首先感谢电子工业出版社的张榕女士，没有她的热情鼓励 and 有效的建议，本书不可能这么快出版；同时没有她认真的审阅和修改，本书的质量也不能保证。还要感谢在写作过程中提出了宝贵意见和建议的李天奎、侯原军、臧晓农、赵晓莉、范吉和等同志，以及出版社其他为本书绘图和进行封面设计的人员，使本书看起来更加精美。由于本书的编写主要是利用业余时间，在编写过程中得到了妻子和女儿的理解和大力支持，也借此机会表示感谢。

作 者

目 录

第 1 章 基础知识	(1)
1.1 电磁兼容技术	(1)
1.2 电磁干扰源	(3)
1.3 敏感源	(17)
1.4 耦合路径	(18)
1.5 频域分析	(20)
1.6 电磁兼容标准	(24)
1.7 电磁兼容试验的方法	(26)
1.8 电磁兼容试验设备	(27)
1.9 分贝的概念	(34)
1.10 TEMPEST	(35)
第 2 章 地线与接地设计	(38)
2.1 安全地	(38)
2.2 信号地	(41)
2.3 地线的阻抗	(42)
2.4 地线干扰形成的原因	(46)
2.5 地环路干扰问题的机理和对策	(47)
2.6 地线公共阻抗干扰的机理和对策	(55)
2.7 地线的设计原则	(58)
2.8 线路板上的地线设计	(61)
第 3 章 电磁屏蔽与搭接	(66)
3.1 屏蔽效能的定义	(66)
3.2 实心屏蔽材料的屏蔽效能	(68)
3.3 低频磁场的屏蔽方法	(74)
3.4 影响屏蔽体屏蔽效能的关键因素	(77)
3.5 缝隙的处理	(80)
3.6 电磁密封衬垫的正确使用	(82)
3.7 截止波导管	(88)
3.8 屏蔽面板的屏蔽设计	(91)

3.9	导电涂覆层	(92)
3.10	搭接	(93)
第4章	干扰滤波技术	(97)
4.1	干扰滤波在电磁兼容设计中的作用	(97)
4.2	共模和差模干扰电流	(100)
4.3	干扰滤波器的电路设计	(102)
4.4	滤波器实现中的问题	(107)
4.5	滤波电容器的选用	(111)
4.6	电感的绕制方法	(116)
4.7	电感磁心的选用	(118)
4.8	电源线滤波器电路	(120)
4.9	电源线滤波器的实现与正确使用	(123)
4.10	信号线滤波器	(130)
4.11	插入增益问题	(134)
4.12	低通滤波器对脉冲干扰的抑制作用	(136)
第5章	电缆设计	(140)
5.1	电缆的辐射问题	(140)
5.2	电缆共模辐射的估算	(146)
5.3	电缆共模辐射的抑制	(148)
5.4	导线之间的串扰	(161)
5.5	电磁场对电缆的影响	(171)
第6章	电路与线路板设计	(182)
6.1	地线和电源线上的噪声	(182)
6.2	线路板上的辐射源	(187)
6.3	扩谱时钟技术	(192)
6.4	控制差模辐射的布线技术	(195)
6.5	多层线路板	(199)
6.6	线路板互连电缆的设计	(207)
6.7	线路板上电路之间的耦合	(210)
6.8	线路板的局部屏蔽	(212)
6.9	从时间上降低电路受干扰概率	(213)
6.10	提高电路抗扰度的软件措施	(214)
第7章	如何顺利通过电磁兼容试验	(217)
7.1	电源谐波传导发射	(217)

7.2 CE101 试验	(219)
7.3 射频传导发射	(221)
7.4 辐射发射	(224)
7.5 电源线功率发射	(228)
7.6 辐射抗扰度试验	(230)
7.7 电快速脉冲 (EFT) 抗扰度试验	(234)
7.8 浪涌抗扰度试验	(240)
7.9 CS106 试验	(247)
7.10 CS114 试验	(250)
7.11 CS115 试验	(253)
7.12 CS116 试验	(254)
7.13 静电放电抗扰度试验	(256)
参考资料	(265)

第 1 章

基础知识

电磁兼容技术本身不是一门新的技术，它所涉及的理论和应用的数学工具与一般的电路和电磁场分析并无特别的差异。本章对电磁兼容设计中常用的知识进行了总结，同时还介绍了一些电磁兼容标准方面的知识。

1.1 电磁兼容技术

自从 20 世纪 20 年代广播通信发明以来，人们就开始研究无线电干扰（电磁干扰）导致的各种问题。当然，首先开始的工作是研究如何定量测量这些电磁干扰。20 世纪 30 年代，人们对电磁干扰已经有了相当多的研究和认识，所研究的问题不仅限于无线电广播产生的干扰，而且还涉及到电动机、电器开关及汽车点火装置对无线电广播所产生的干扰。在 1933 年，针对越来越严重的电磁干扰问题，国际电工委员会（IEC）成立了国际无线电干扰特别委员会（CISPR, Comite International Special des Perturbations Radioelectrique）。1934 年，CISPR 召开了第一次会议，主要议题是确定一个合理的无线干扰限制值，以及如何对电磁干扰进行测量。

在第二次世界大战中，由于远程通信和雷达在军事上的应用，极大地促进了电磁兼容问题的研究，一些军用标准和规范随之诞生。

今天，电子技术已经深深地融入各行各业，电磁干扰的问题也愈加突出。因此使这些电子设备达到电磁兼容的状态也成为产品开发工程师、系统集成工程师及用户关心的问题，同时也成为政府管理工作的一部分。

在电子产品的设计中采取预防措施，使这些电子设备在实际的使用环境中能够可靠地工作所需要的技术就是本书要讨论的电磁兼容技术。电磁兼容技术已经不再是从事军用设备和航天设备开发的工程师才需要掌握的技术，而是任何一名电子产品工程师都需要掌握的技术。

产生电磁兼容问题，或者叫做电磁干扰问题，需要同时具备三个条件：

- （1）干扰源：产生干扰的电路或设备；
- （2）敏感源：受这种干扰影响的电路或设备；

(3) 耦合路径：能够将干扰源产生的干扰能量传递到敏感源的路径。

以上三个条件称为电磁兼容的三要素，只要将这三个要素中的一个消除，电磁干扰的问题就不再存在。因此，电磁兼容技术是围绕着这三个要素展开的。通过研究每个要素的特点，提出消除每个要素的技术手段，以及这些技术手段在实际工程中的实现方法。

一个日常生活中常见的电磁干扰例子如图 1-1 所示。仔细观察一下电视机的屏幕，经常会发现一些频道的屏幕上有条纹状的干扰，这些干扰影响了电视屏幕的图像质量。近些年，干扰现象越来越普遍，这是因为目前大量使用了数字视频设备，例如 VCD、DVD、卫星接收设备及其他包含数字电路的设备，这些设备会产生很强的干扰。

本例中，敏感源是电视接收机，干扰源是与电视机连接在一起的数字视频设备，耦合路径如下：

(1) 电视机与数字设备共用的电源插座。数字设备产生的干扰通过电源线以传导的方式传进电视机，对电视机形成干扰。

(2) 电视机与数字设备之间的互连电缆（音频、视频）。信号电缆在传输有用信号的同时，也将干扰信号传进电视机。

(3) 数字设备产生的空间辐射电磁波从空间耦合进电视机的电路，形成干扰。

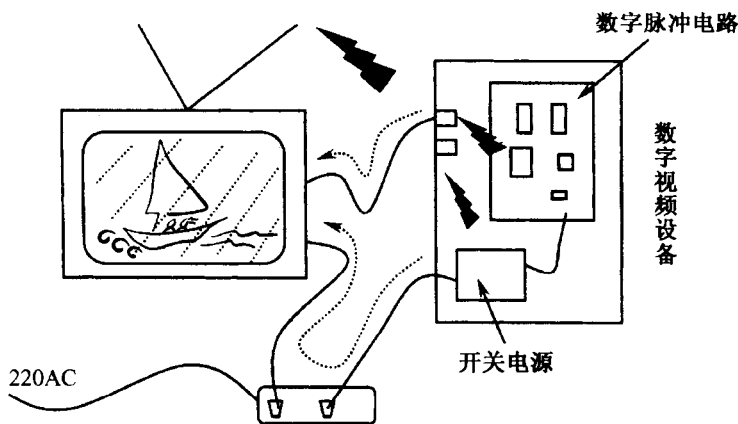


图 1-1 日常生活中常见的电磁干扰现象

有时，电视机并没有连接任何数字视频设备，或者所连接的数字设备没有通电工作，而电视机上还是有干扰条纹。这是怎样产生的呢？这是因为邻居家在使用数字设备，不仅限于数字视频设备，电脑等也包括在内。这些数字设备产生的干扰传进了闭路电视网络和公共电网。

要解决这类电磁兼容的问题，需要分析数字设备产生干扰的原因，如干扰是怎样

传进电视接收机的，又是怎样在屏幕上表现出来的，最终提出一个解决的方案。在本例中，消除敏感源是不可能的，只能想办法消除干扰源或耦合路径。

1.2 电磁干扰源

要消除电磁干扰源，就需要了解电磁干扰源的特点，包括干扰的频率范围、干扰的主要发射方式、所辐射的电磁波的特点等，这些都是正确采取技术措施的前提。现实环境中的电磁干扰源分为自然的和人为的两种。自然干扰源是指自然现象引发的电磁干扰，人为干扰源是指人造设备工作时伴随的电磁干扰。下面介绍有关电磁干扰源方面的知识。

1. 自然干扰源

雷电是一种主要的自然干扰源。雷电现象实际上是发生在云层之间或云与地面之间的静电放电现象，其实际过程十分复杂。我们关心的是雷电现象所产生的电磁干扰。

雷电伴随的瞬间放电电流会达到 20 万安培，该放电电流会感应出一个很强的电磁场，这个电磁场作用在设备的电源线或信号电缆上，会产生幅度很高的电压，对设备造成伤害，如图 1-2 所示。雷电现象是无法控制的，只能对设备进行抗雷电设计，使其能抵御雷电的影响。

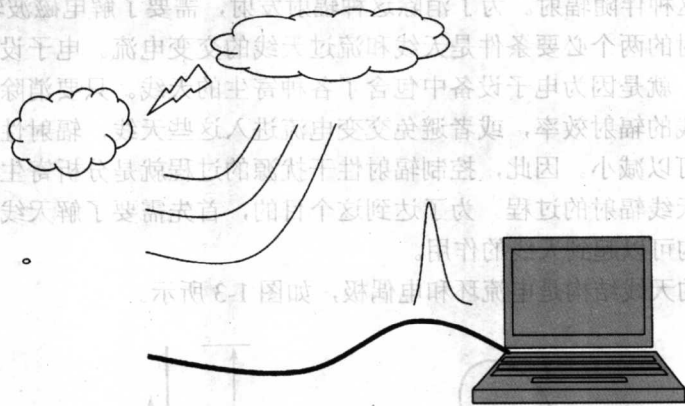


图 1-2 雷电对设备的影响

2. 人为干扰源

实际环境中更常见的干扰是人为干扰源。人为产生的干扰有些是为了特定功能发射出来的电磁能量，例如无线通信、雷达等；有些是设备工作时伴随发射的，例如数

字设备、开关电源、电感性负载的接通与断开等。对于功能性发射，虽然发射能量是不可避免的，但是要限制那些功能发射频率以外的伴随发射，这主要是指谐波的泄漏发射。

对于非功能性发射，要尽量加以抑制。各种电磁兼容标准中的发射限制主要是针对非功能性发射而言的。自 2003 年 8 月 1 日起，中国开始对大部分产品的电磁兼容性实施强制认证，如果产品产生过度的电磁干扰发射就不能在市场上销售。因此，限制电子设备的伴随电磁干扰发射已经成为产品设计中必须考虑的设计项目之一。

一般产生较强伴随干扰发射的电路都具有一个特点，即电路中的电压或电流发生剧烈的变化，也就是 dV/dt 或 dI/dt 很大。因为电压和电流的剧烈变化，意味着电压和电流中包含了较多的高频成分。这些高频成分容易产生电磁波辐射和电磁耦合。因此，凡是有电压或电流突变的场合，就应该对伴随发射引起重视。常见的例子如下：

- (1) 数字脉冲电路，随着产品的信息化和智能化发展，这种电路无所不在；
- (2) 工作在开关模式的电源（开关电源），包括 AC/DC 变换器、DC/DC 变换器；
- (3) 电感性负载的接通和断开。

3. 辐射天线

电气、电子设备工作时产生的伴随电磁辐射是一类主要的干扰源，这种辐射称为伴随辐射是因为它并不是设备为了完成预定的功能而必须发射的，所有的电子设备都必须尽量消除这种伴随辐射。为了消除这种辐射发射，需要了解电磁波辐射的条件。

电磁波辐射的两个必要条件是天线和流过天线的交变电流。电子设备之所以会产生辐射性干扰，就是因为电子设备中包含了各种寄生的天线。只要消除寄生天线，或者降低这些天线的辐射效率，或者避免交变电流进入这些天线，辐射性的电磁干扰也就不再存在或可以减小。因此，控制辐射性干扰源的过程就是分析寄生天线、消除寄生天线、控制天线辐射的过程。为了达到这个目的，首先需要了解天线的结构，也就是什么样的结构可以起到天线的作用。

两个基本的天线结构是电流环和电偶极，如图 1-3 所示。



图 1-3 基本天线结构

关于这两个基本天线结构的分析在一般的电磁场书中都有论述。为了便于工程应用,对原来比较复杂的公式做适当的简化,得到式(1-1)至式(1-8)等一系列简明的公式。简化的基本方法是仅考虑最大值,并忽略一些较小的项,具体的数学推导过程这里省略。

根据观测点到辐射源的距离,将区域分为近场区和远场区。观测点到辐射源的距离小于 $\lambda/2\pi$ 的区域称为近场区,观测点到辐射源的距离大于 $\lambda/2\pi$ 的区域称为远场区, $\lambda/2\pi$ 附近的区域称为过渡区。在近场区和远场区,这两种天线辐射的电磁场的表述都比较简单,但在过渡区比较复杂。

1) 电流环天线的辐射特性

下面的结论基于如下假设:

- 环路中的电流是均匀的
- 除了环路自身的电抗以外,环路导线的阻抗为零
- 环路的尺寸 $\ll \lambda$
- 环路的尺寸 $<$ 环路 with 观测点之间的距离 D
- 环路处于自由空间中,附近没有金属物体

(1) 在近场区 ($D < \lambda/2\pi$)

$$H = IA/4\pi D^3 \text{ (A/m)} \quad (1-1)$$

$$E = Z_0 IA/2\lambda D^2 \text{ (V/m)} \quad (1-2)$$

式中 H —— 电流环辐射的磁场 (A/m);

E —— 电流环辐射的电场 (V/m);

I —— 环路中的电流 (A);

A —— 环路面积 (m^2);

λ —— 电流频率对应的波长 (m);

D —— 观测点到电流环的距离 (m);

Z_0 —— 自由空间的特征阻抗,通常为 $120\pi\Omega$ 或 377Ω 。

从式(1-1)可知,磁场的辐射强度与频率无关,公式对直流也是适用的。磁场的强度随距离的三次方衰减。因此利用增加距离来减小磁场强度是十分有效的方法。

从式(1-2)可知,电场的辐射强度随频率升高而增加,随距离的平方而衰减。

(2) 在远场区 ($D > \lambda/2\pi$)

$$H = \pi IA/\lambda^2 D \text{ (A/m)} \quad (1-3)$$

$$E = Z_0 \pi IA/\lambda^2 D \text{ (V/m)} \quad (1-4)$$

式中符号含义同近场区。

在远场区，电场和磁场的辐射强度都随频率的平方增加，这就是为什么脉冲电路的干扰很强的原因。脉冲信号中包含了大量的高频成分，其辐射效率很高。

2) 电偶极天线的辐射特性

计算电偶极天线的辐射时，与电流环的不同点在于，只有交流电流才能够形成回路，这种电流是通过空间的杂散电容形成的位移电流，如图 1-4 所示。

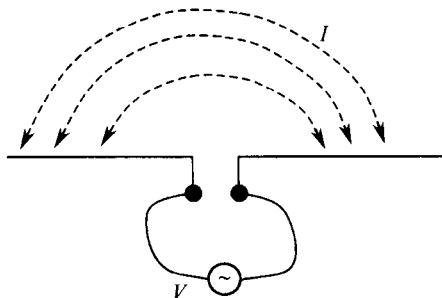


图 1-4 电偶极中的电流

下面的结论基于与电流环路类似的如下假设：

- 电偶极导体上的电流是均匀的；
- 电偶极的长度 $\ll \lambda$ ；
- 电偶极的长度 $<$ 电偶极与观测点之间的距离 D ；
- 电偶极处于自由空间中，附近没有金属物体。

(1) 在近场区 ($D < \lambda/2\pi$)

$$H = IL/4\pi D^2 \text{ (A/m)} \quad (1-5)$$

$$E = Z_0 IL\lambda/8\pi^2 D^3 \text{ (V/m)} \quad (1-6)$$

式中 H —— 电偶极辐射的磁场 (A/m)；

E —— 电偶极辐射的电场 (V/m)；

I —— 电偶极中的电流 (A)；

L —— 电偶极的长度 (m)；

λ —— 电流频率对应的波长 (m)；

D —— 观测点到电偶极的距离 (m)；

Z_0 —— 自由空间的特征阻抗，通常为 $120\pi\Omega$ 或 377Ω 。

从式 (1-6) 可知，电场强度随着频率增加而减弱。这似乎与常识不符，一般认为频率越高辐射越强。实际上，这个问题要这样理解：电流 I 是由加在电偶极上的电压 V 和电偶极之间的电容 C 决定的。当 I 一定时，频率越高，电偶极之间的容抗越低，需

要的驱动电压越低, 因此产生的电场强度越小。

(2) 在远场区 ($D > \lambda/2\pi$)

$$H = IL/2\lambda D \text{ (A/m)} \quad (1-7)$$

$$E = Z_0 IL/2\lambda D \text{ (A/m)} \quad (1-8)$$

4. 实际电路的辐射

以上两个基本天线模型可以用来查找设备中的寄生天线, 只要存在电流环路, 就构成了一个电流环路天线; 只要存在电压驱动两个导体, 就构成了一个电偶极天线。但是, 用这两个模型计算实际电路的辐射会产生较大的误差, 因为实际电路很难满足这些基本天线中的假设条件。

当用电偶极天线模型计算实际电路的电场辐射强度时, 计算结果会大于实际的电场强度, 因为实际电路的阻抗并不是无限大。对于电磁干扰预测而言, 由于考虑了最坏的情况, 这个误差是能够接受的。

当用电流环路模型计算实际电路的电场辐射强度时, 计算结果会小于实际的电场强度, 实验结果表明, 最大可以相差 60dB 以上。这显然是不能接受的。因此需要对基本天线模型进行修正, 使其更符合实际电路的辐射预测。

一个更符合实际情况的模型如图 1-5 所示。这个电路既不是完全开路的, 也不是完全短路的, 而是有一个适中的值 Z_C :

$$Z_C = Z_G + Z_L \quad (1-9)$$

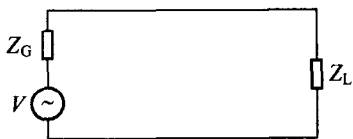


图 1-5 实际电路的模型

1) 在近场区

根据电路的阻抗不同, 计算方法也不同。

(1) 如果 $Z_C \geq 7.9Df$ (D 的单位为 m, f 的单位为 MHz)

则

$$E = VA/4\pi D^3 \text{ (V/m)} \quad (1-10)$$

式中 E —— 电路辐射的电场强度 (V/m);

V —— 驱动源的电压 (V);

A —— 电路的面积 (m^2);

D —— 观测点到电路的距离 (m)。

在实际工作中常用 $\mu\text{V/m}$ 做单位, 这时的计算公式如下:

$$E = VA/4\pi D^3 \quad (\mu\text{V/m}) \quad (1-11)$$

式中 E —— 电路辐射的电场强度 ($\mu\text{V/m}$);

V —— 驱动源的电压 (V);

A —— 电路的面积 (cm^2);

D —— 观测点到电路的距离 (m)。

(2) 如果 $Z_c < 7.9Df$ (D 的单位为 m, f 的单位为 MHz)

则

$$E = 0.63IAf/D^2 \quad (\text{V/m}) \quad (1-12)$$

式中 E —— 电路辐射的电场强度 (V/m);

I —— 电路中的电流 (A);

f —— 电流的频率 (MHz);

A —— 电路的面积 (m^2);

D —— 观测点到电路的距离 (m)。

在实际工作中常用 $\mu\text{V/m}$ 做单位, 这时的计算公式如下:

$$E = 63IAf/D^2 \quad (\mu\text{V/m}) \quad (1-13)$$

式中 E —— 电路辐射的电场强度 ($\mu\text{V/m}$);

I —— 电路中的电流 (A);

f —— 电流的频率 (MHz);

A —— 电路的面积 (cm^2);

D —— 观测点到电路的距离 (m)。

当电路的阻抗很低时, 它所辐射的磁场也是不能忽略的, 辐射磁场 H 的计算公式如下:

$$H = IA/4\pi D^3 \quad (\text{A/m}) \quad (1-14)$$

式中 H —— 电路辐射的磁场强度 (A/m);

I —— 电路中的电流 (A);

A —— 环路面积 (m^2);

D —— 观测点到电流环的距离 (m)。

注意: 式 (1-14) 与高阻电路辐射的电场强度式 (1-11) 是对称的, IA 通常称为磁矩。

2) 在远场区

在远场区, 电场辐射强度与电路的阻抗无关, 表示式如下:

$$E = 1.3IAf^2/D \quad (\mu\text{V/m}) \quad (1-15)$$

式中 E ——电路辐射的电场强度 ($\mu\text{V/m}$);

I ——电路中的电流 (A);

A ——电流回路的面积 (cm^2);

D ——观测点到电流环的距离 (m)。

5. 波阻抗

在电磁兼容设计中,波阻抗的概念十分重要,特别是在进行屏蔽设计时,必须考虑所屏蔽对象电磁波的波阻抗。波阻抗的定义如下:

$$Z_w = E/H \quad (\Omega) \quad (1-16)$$

式中 Z_w ——波阻抗 (Ω);

E ——电磁波中的电场分量 (V/m);

H ——电磁波中的磁场分量 (A/m)。

如果电磁波中的电场分量较大,波阻抗就较高,称为高阻抗波,或电场波。反之,如果磁场分量较大,波阻抗就较低,称为低阻抗波,或磁场波。在近场区中的某个位置,电磁波的波阻抗与辐射源的阻抗、频率、辐射源周围的介质及观测点到辐射源的距离有关。在远场区,波阻抗等于电磁波传播介质的特性阻抗,在真空中为 377Ω 。

电流环和电偶极辐射的电磁波代表了典型的磁场波和电场波,它们的波阻抗如图 1-6 所示。从式 (1-1) 和式 (1-2) 可知,对于电流环的辐射场,在近场区随着距离的增加,磁场的衰减比电场的衰减快,波阻抗呈现增加的趋势。从式 (1-5) 和式 (1-6) 可知,对于电偶极的辐射场,在近场区随着距离的增加,磁场的衰减比电场的衰减慢,波阻抗呈现下降的趋势。

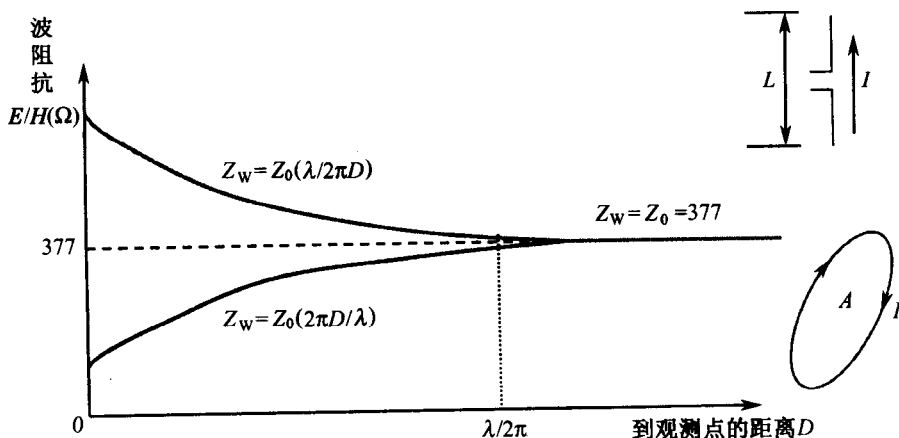


图 1-6 电流环天线和电偶极天线的波阻抗