

电磁兼容技术系列



郑军奇 / 编著

# EMC

## 电磁兼容

### 设计与测试案例分析

(第3版)



 中国工信出版集团

 电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

电磁兼容技术系列

郑军奇 / 编著

# EMC

## 电磁兼容

### 设计与测试案例分析

(第3版)



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书以 EMC 案例分析为主线,通过案例描述、分析来介绍在产品中的 EMC 技术,向读者介绍产品在设计过程中有关 EMC 的实用设计技术与诊断技术,减少设计人员在产品的设计与 EMC 问题诊断中的误区。书中所描述的 EMC 案例涉及结构、屏蔽与接地、滤波与抑制、电缆、布线、连接器与接口电路、旁路、去耦与储能、PCB layout,以及器件、软件与频率抖动技术等各个方面。

本书以实用为目的,以具有代表性的案例说明复杂的原理,并尽量避免拖沓冗长的理论,可作为电子产品设计部门 EMC 方面必备的参考书,也可作为电子和电气工程师、EMC 工程师、EMC 顾问人员进行 EMC 培训的教材或参考资料。

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

EMC 电磁兼容设计与测试案例分析/郑军奇编著. —3 版. —北京:电子工业出版社,2018.7  
(电磁兼容技术系列)

ISBN 978-7-121-34293-6

I. ①E… II. ①郑… III. ①电磁兼容性-设计 IV. ①TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 111026 号

责任编辑:牛平月(niupy@phei.com.cn)

印 刷:三河市君旺印务有限公司

装 订:三河市君旺印务有限公司

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:26.5 字数:678.4 千字

版 次:2006 年 12 月第 1 版

2018 年 7 月第 3 版

印 次:2018 年 7 月第 1 次印刷

定 价:98.00 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)88254888,88258888。

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。

本书咨询联系方式:(010)88254454,niupy@phei.com.cn。

## 第3版序言

《EMC 电磁兼容设计与测试案例分析》自 2006 年出版，并于 2010 年改版至今，一直受到广大读者的高度关注，已经成为国内 EMC 领域的畅销书籍。《EMC 电磁兼容设计与测试案例分析》第 3 版在第 2 版已有的案例分析基础上，增加了 13 个经典案例，更新了书中涉及的政策、标准方面的相关信息，并修改了原有的缺陷，使本书的内容在 EMC 设计方法的描述上变得更为全面、精确。

2010 年出版的《EMC 电磁兼容设计与测试案例分析》（第 2 版）通过新增加的案例描述了以下 7 个重要的 EMC 设计原理与措施：

- (1) EMC 测试的实质，解析标准规定的各种 EMC 测试项目的实质；
- (2) 电源端口滤波电路的设计方法，包括滤波电路的选择、滤波元件参数的选择；
- (3) 数/模混合电路的 EMC 设计方法，不但澄清了数/模混合电路与数/模电路之间的串扰问题，而且澄清了如何从系统上考虑 EMC 问题，特别是广大设计者比较疑惑的数字地与模拟地的处理问题；
- (4) PCB 中地平面进行“分地”的优缺点；
- (5) PCB 板边缘为何不能布置敏感线、敏感器件、时钟线或时钟器件等的原理，并给出了具体的解决与弥补措施；
- (6) 设计多层 PCB 板时的层叠设计与 EMC 问题；
- (7) 由环路引起的差模辐射量级。

而《EMC 电磁兼容设计与测试案例分析》（第 3 版）通过新案例的增加，将明确解答并解释如下 8 个重要的 EMC 设计点：

- (1) PCB 板的工作地与产品金属机壳是否需要连接？
- (2) PCB 板的工作地与产品金属机壳之间连接的关键点是什么？
- (3) 在工程中最怕的地上有干扰实际上是什么？
- (4) 屏蔽电缆是否需要双端接地？
- (5) 信号的上升沿时间对 EMI 水平有何影响？
- (6) 如何选择单/双向 TVS 管？
- (7) 如何防止浪涌和过压保护电路产生的安全隐患？
- (8) 产品内部 PCB 板之间的互联对产品 EMC 的性能意味着什么？

本书涉及的 EMC 设计与整改方法将更为全面，案例所涉及的产品有信息技术/音视频、电动车、工业控制、家用电器、电机、开关电源、医疗设备、汽车零部件等。本书的内容也是作者“EMC 测试与设计案例分析”培训课程的基础参考材料，“EMC 测试与设计案例分析”培训课程是国内最为经典的、实践与原理结合最好的 EMC 课程，也是作者的经典培训课程，受到企业与培训学员的高度评价。

EMC 是一门综合的、以研究寄生参数为要点的共模学科。纵观世界，到目前为止，EMC 学科仍然可认为是疑难学科。一个企业，如果掌握了 EMC 技术的精髓，那么可以认为

掌握了一种提升产品质量的核心技术；一个电子电气工程师，如果掌握了 EMC 技术的精髓，那么也可以认为掌握了电子电气产品设计的关键技术。然而，虽然大部分工程人员承认 EMC 是一门共性技术，但是在实践中往往又不够重视，导致的结果是，产品设计过程存在许多对 EMC 本质问题的误解，消除这些误解才能解决不可避免的 EMC 难题。这些误解主要体现在以下方面。

### 1. 概念上

**EMC 模型被简单化：**产品由测试不通过变成通过往往会靠一些简单的措施（如加一个接地螺钉、增加一个电容等），这就会导致部分工程人员误认为产品的 EMC 性能不是被精心设计出来的，而是仅仅靠最后一两个措施就可以获得的。实际上，任何一个产品的 EMC 性能在原理上都是一个整体系统的问题，产品有多复杂，EMC 就有多复杂，只有在设计产品时全方面地考虑各种因素，才能最终获得较高的 EMC 性能，通过 EMC 测试。产品设计者一定要用系统的眼光看待每一个产品的 EMC 问题。EMC 问题是一个“过程”，而不是个别“点”。

**不愿意付出就想回报高性能的 EMC 结果：**成本和工艺虽然是产品在设计过程中必须要重点考虑的问题，但是无法成为阻挡提升产品 EMC 性能的借口。要知道，产品的 EMC 性能是由产品在设计过程中点点滴滴的付出而获得的。这些付出必然包括成本的付出和工艺的付出。对于企业来说，重要的不是一味地省去这些成本，而是让自己具备达到同样 EMC 效果却付出最小代价的能力。高 EMC 性能的获得，必然意味着付出。

### 2. 技术上

**理解 EMC 的接地意义与本质：**“接地”这个词在接触 EMC 之前已经进入广大电子产品设计者的视野中了，大家最熟悉的“地”就是自然界的地球。电子、电气产品为了安全，需要把产品的某个金属导体接入“大地”（称为“保护地”），即自然界的地球（通常通过建筑物或专用的接地线排接入）。对于 EMC 来讲，“接地”可以最大限度地降低产品的 EMI 辐射，也可以最大限度地减小进入产品的外界干扰。然而，需要把产品接入自然界的大地吗？如何正确理解 EMC 中的“接地”？案例 1、案例 2 和案例 16 在一定程度上给出了以上问题的答案，控制好产品 EMC 并不一定需要把产品接入自然界地球的“地”。对于 EMC 来说，“接地”是为了引导共模电流的流向。实际上，对于 EMI，EMI 骚扰源的参考点是 PCB 中工作地的某一点，为了让骚扰源通过各种途径流入“天线”（如产品中的电缆），正确的接“地”点应该为这个 PCB 中工作地的某一点，可见，这种“接地”从 EMI 骚扰的流向上看应该发生在“天线”（如电缆）之前；对于产品的大多数高频抗扰度来说，干扰源的参考点为测试时的参考接地板，正确的接“地”点应该为参考接地板。它“接地”的目的是让外部注入的共模电流不流入产品中的电路。可见，这种“接地”从干扰的流向上看，发生在产品的电路之前。产品的“接地”设计首先需要考虑的并非选择或设计“单点接地”或“多点接地”，而是考虑“接地”点的位置和“接地”的措施。如果产品具有金属外壳，则以上两种“接地”都可以借助金属外壳或其他寄生参数很好地实现。这就是金属外壳设备为什么更容易通过 EMC 测试的原因。对于非金属外壳，这两种接地相对变得更为困难，通过 EMC 测试也会变得更难。

**屏蔽电缆的屏蔽层：**屏蔽电缆的屏蔽层如何接地？单端接地还是双端接地一直是在工程领域中讨论的话题，工程设计者经常会碰到一些实际的案例，对于某一些产品，似乎屏蔽电缆单端接地时系统更为稳定；而对于另一些产品，屏蔽电缆采用双端接地后系统才显得更为

稳定。到底如何连接，案例 19 解答了这个疑问。然而解决了屏蔽电缆屏蔽层要不要接地的问题，还必须关注屏蔽层如何接地的问题。如果屏蔽层与机壳之间的连接存在“猪尾巴”，那么就会导致屏蔽效果失效，案例 18 将解开这些奥秘。

**壳体屏蔽：**假设以上所说的差模辐射超标是一种现实（或产品所导致辐射超标的等效“天线”在屏蔽体内），那么很简单，只要用一个开孔不是很大的金属外壳进行屏蔽就可以解决。此时，金属外壳不需要与 PCB 板做任何连接。随着以上误解的消除，产品所导致辐射超标的等效“天线”通常也在屏蔽体外（如电缆）时，这种金属外壳“屏蔽”的必要性也逐渐下降。案例 14 是产生这种误解的一个典型案例。利用金属外壳取得更好的 EMC 性能是因为金属外壳提供了更好的“接地”路径或旁路路径，要使这种路径变得更为直接，就需要考虑 PCB 板与金属外壳之间做合理的互联。设计人员必须消除这种误解，当为产品增加“屏蔽”时，必须对此“屏蔽”所产生的后果负责。为产品设计屏蔽时，必须考虑所产生辐射等效“天线”的物理位置，如果不能将其也屏蔽在内，那么就必须在 PCB 板与金属外壳之间做合理的互联，实现“屏蔽”与“旁路”的转化。

**滤波：**电容、电感是滤波电路的基本元件。电感会产生感抗，随频率的增大而增大；电容会产生容抗，随频率的增大而减小。当在原来的电路中串入一个电感或并联一个电容时，电感/电容所形成的分压网络会降低负载上的干扰电压。这似乎没有任何问题，或者说“多串一个电感或多并联一个电容，或多或少是有好处的”。事实上，电感、电容作为储能元件，其上的电压、电流存在相位关系，电感、电容所组成滤波网络的一种极端表现就是谐振，如 LC 滤波电路发生谐振时，干扰信号并没有被衰减，相反被放大了，这非常可怕。设计好滤波电路，就必须消除这种隐患，滤波电路的谐振点必须远离 EMC 测试频点。同样，滤波器件也并非越多越好。

**浪涌与过电压保护电路：**浪涌与过电压在 EMC 中相对特殊，原因之一是其干扰频率相对较低（典型的干扰频率是数十千赫）；其二是干扰能力相对较大，通常具有破坏产品中元器件的能力。在保护理念上，浪涌和过电压保护电路的设计相对简单，就是哪里有过电压或浪涌，就将保护器件（通常是非线性瞬态抑制保护器件）并联在出现浪涌或过电压的两端，只要选择钳位电压足够低的器件或电路就能达到保护效果。然而，电路虽然得到了浪涌和过电压的保护，但有可能带来额外的安全隐患，导致不可预测的灾难。案例 51、案例 53、案例 55 对常见的隐患做出了解释并给出了解决方案。

# 前 言

在国内市场上,大部分的 EMC 书籍存在的一个共同缺陷就是设计与测试脱节。谈论 EMC 设计技术与方法需要建立在 EMC 测试原理的基础上,不仅仅是因为 EMC 设计的第一道门槛就是 EMC 测试,更重要的是在 EMC 测试的标准中给出了明确的干扰源、接收源等模型。它们都是 EMC 问题分析中不可缺少的部分。如传导骚扰测试,它的实质是 LISN 中一个电阻两端的电压,在电阻一定的情况下,传导骚扰的高低取决于流经 LISN 中这个电阻的电流。EMC 设计就是为了降低流经这个电阻的电流;又如 EFT/B 测试、BCI 测试、ESD 测试等抗扰度测试,它们是典型的共模抗扰度测试,干扰源是相对于参考接地板的共模电压,也就意味着这些干扰源的参考点是进行这些测试时的参考接地板,干扰所产生的所有干扰电流最终都要流回参考接地板,这是分析这类干扰问题的基本点。设想一下,对于以上所说的传导骚扰测试来说,如果在测试设计的产品时,骚扰电流不流过 LISN 中的那个电阻,同时,对于抗扰度测试来说,干扰电流也不经过产品电路,那么这个产品肯定是通过 EMC 测试的。因此,EMC 设计必须从 EMC 测试开始。《EMC 电磁兼容设计与测试案例分析》(第 3 版)是一本紧密结合 EMC 测试实质、EMC 设计原理及具体产品设计,来讲述 EMC 设计方法的工程参考用书。实践性与理论性的高度结合是本书的最大特点。

本书分为 7 章。其中,第 1 章描述 EMC 基础知识及 EMC 测试实质,为第 2 章~第 7 章的内容做铺垫。当读者在阅读后续章节,对一些基本概念比较模糊时可以方便查阅。第 2 章~第 7 章是案例部分,所涉及的均为 EMC 典型案例。案例描述都采用同样的格式,即包含“现象描述”“原因分析”“处理措施”“思考与启示”四部分。试图通过每个案例的分析,向设计人员介绍有关 EMC 的实用设计与诊断技术,减少在产品设计与 EMC 问题诊断中存在的误区,使产品具有良好的 EMC 性能。同时,通过案例说明 EMC 设计原理,为的是让读者更好地理解设计的由来。“思考与启示”部分实际上是问题的总结与相关问题的注意事项,也可以作为产品设计的 EMC 检查列表。案例分为下述 6 大类。

- **产品的结构构架、屏蔽、接地与 EMC:** 对于大部分设备而言,屏蔽都是必要的。特别是随着电路工作频率的日益提高,单纯依靠线路板设计往往不能满足 EMC 标准的要求。合理的屏蔽能大大加强产品的 EMC 性能,但是不合理的屏蔽设计不但不能起到预期的效果,相反可能引入一些额外的 EMC 问题。另外,接地不单有助于解决安全问题,同样对 EMC 也相当重要,许多 EMC 问题是由不合理的接地设计引起的。因为地线电位是整个电路工作的基准电位,如果地线设计不当,则地线电位就不稳,就会导致电路故障,也有可能产生额外的 EMI 问题。接地设计的目的是要保证地线电位尽量稳定,降低地压降,从而消除干扰现象。
- **产品中的电缆、连接器、接口电路与 EMC:** 电缆总是引起辐射或引入干扰的最主要通道,因为长度原因,电缆不单是“发射天线”,同时也是良好的“接收天线”。与电缆有最直接关系的就是连接器与接口电路。良好的接口电路设计不但可以使内部电路的噪声得到很好的抑制,使“发射天线”无驱动源,同样也可以滤除电缆从外界接收到的干扰信号。正确的连接器设计又给电缆与接口电路提供了一个很好的配合通道。

- **通过滤波与抑制提高产品 EMC 性能：**对于任何设备而言，滤波与抑制都是解决电磁干扰的关键技术之一。因为设备中的导线是效率很高的接收和辐射天线，因此设备产生的大部分辐射发射都是通过各种导线实现的，而外界干扰往往也是首先被导线接收到，然后串入设备的。滤波与抑制的目的就是消除导线上的这些干扰信号，防止电路中的干扰信号传到导线上，借助导线辐射，也防止导线接收到的干扰信号传入电路。
- **旁路和去耦：**当器件工作时，时钟和数据信号脚上的信号电平按规律发生变化，此时，去耦将提供给元件在时钟和数据变化期间正常工作的足够动态电压和电流。去耦是通过在信号线和电源平面间加一个低阻抗的电源来实现的。在频率升高到自谐振点之前，随着频率的提高，去耦电容的阻抗会越来越低。这样，高频噪声会有效地从信号线上泄放，余下的低频射频能量就没有什么影响了。最佳的实现效果可通过储能、旁路、去耦电容来达到。这些电容的值可通过特定的公式计算得到。另外，必须正确地适当地选择电容的绝缘材料，而不是根据过去的用法和经验来随意选择。
- **PCB 设计与 EMC：**无论设备产生电磁干扰发射还是受到外界干扰的影响，或者电路之间产生相互干扰，PCB 都是问题的核心，无论是 PCB 中的器件布局，还是 PCB 中的线路布线，都会对产品整体的 EMC 性能产生本质的影响。例如，接口连接器的仿真位置将影响共模电流流经的方向，布线的路径将影响电路环路的大小。这些都是 EMC 的关键，因此设计好 PCB 对于保证设备的 EMC 性能具有重要的意义。PCB 设计的目的就是减小 PCB 上电路产生的电磁辐射和对外界干扰的敏感性，减小 PCB 上电路之间的相互影响。
- **器件、软件与频率抖动技术：**电路由器件构成，但是器件的 EMC 性能往往被忽略掉，其实器件的封装、上升沿、管退分布及器件本身的抗 ESD 能力都对器件所应用产品的 EMC 性能产生很大的影响。软件虽然不是输入 EMC 学科范畴，但是在有些情况下，利用软件提供的容错技术可以避开产品对外界干扰的影响。频率抖动技术是近年来流行的一种降低电路传导骚扰和辐射骚扰的技术，但是该技术也不是万无一失的。本书中的案例将详细说明频率抖动技术的实质及注意事项。

EMC 设计规则犹如交通法规，虽然不遵守交通法规不一定会出交通事故，但是风险必然变大。EMC 设计也是一样，有些规则不遵守或许也能在测试中过关，但是不遵守规则测试不过关的风险必然加大，所以在产品设计中有必要引入风险意识，EMC 设计的目的是最大限度地降低 EMC 测试风险，只有遵守所有 EMC “规则”的产品才是具有最低 EMC 风险的产品。本书的大部分内容来自于笔者在实际工作中碰到的 EMC 问题，每个案例都有较详细的理论分析过程，并从中得出参考经验。这些案例是笔者积累的大量 EMC 案例中的典型，每一个案例的结果都形成了一个或多个 EMC 设计规则，这是值得借鉴与参考的。由于笔者所从事产品范围的限制，也许不能包含各类电子、电器产品的 EMC 问题，同时也可能由于笔者知识的不全面性，导致出现一些描述不合理或不精确，甚至错误的地方，还望广大读者指出。

在此我要特别感谢为本书提过宝贵意见及建议的吴勤勤教授、博导，同时还要感谢深圳滨城电子的各位技术专家，及对本书提过宝贵意见的各位同人；另外也要感谢电子工业出版社的牛平月编辑及其同事。

注：鉴于 EMC 测试系统多为英文板，为方便读者阅读，本书中部分图、表未进行翻译，保持英文原版。

郑军奇

于 2018 年



## 反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路173信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

# 目 录

第 1 章 EMC 基础知识及 EMC 测试实质 .....	(1)
1.1 什么是 EMC .....	(1)
1.2 传导、辐射与瞬态 .....	(2)
1.3 理论基础 .....	(3)
1.3.1 时域与频域 .....	(3)
1.3.2 电磁骚扰单位分贝 (dB) 的概念 .....	(4)
1.3.3 正确理解分贝真正的含义 .....	(5)
1.3.4 电场、磁场与天线 .....	(8)
1.3.5 RLC 电路的谐振 .....	(14)
1.4 EMC 意义上的共模和差模 .....	(17)
1.5 EMC 测试实质 .....	(18)
1.5.1 辐射发射测试实质 .....	(18)
1.5.2 传导骚扰测试实质 .....	(21)
1.5.3 ESD 抗扰度测试实质 .....	(22)
1.5.4 辐射抗扰度测试实质 .....	(23)
1.5.5 共模传导性抗扰度测试实质 .....	(25)
1.5.6 差模传导性抗扰度测试实质 .....	(27)
1.5.7 差模共模混合的传导性抗扰度测试实质 .....	(27)
第 2 章 产品的结构构架、屏蔽、接地与 EMC .....	(28)
2.1 概论 .....	(28)
2.1.1 产品的结构构架与 EMC .....	(28)
2.1.2 产品的屏蔽与 EMC .....	(29)
2.1.3 产品的接地与 EMC .....	(30)
2.2 相关案例分析 .....	(31)
2.2.1 案例 1: PCB 工作地与金属壳体到底应该关系如何 .....	(31)
2.2.2 案例 2: 接地方式如此重要 .....	(33)
2.2.3 案例 3: 传导骚扰与接地 .....	(37)
2.2.4 案例 4: 传导骚扰测试中应该注意的接地环路 .....	(41)
2.2.5 案例 5: 屏蔽体外的辐射从哪里来 .....	(44)
2.2.6 案例 6: “悬空”金属与辐射 .....	(46)
2.2.7 案例 7: 伸出屏蔽体的“悬空”螺柱造成的辐射 .....	(49)
2.2.8 案例 8: 屏蔽材料的压缩量与屏蔽性能 .....	(52)
2.2.9 案例 9: 开关电源中变压器初、次级线圈之间的屏蔽层对 EMI 的作用有多大 .....	(55)
2.2.10 案例 10: 金属外壳接触不良与系统复位 .....	(60)
2.2.11 案例 11: 静电放电与螺钉 .....	(61)

2.2.12	案例 12: 怎样接地才有利于 EMC	(62)
2.2.13	案例 13: 散热器形状影响电源端口传导发射	(66)
2.2.14	案例 14: 金属外壳屏蔽反而导致 EMI 测试失败	(70)
2.2.15	案例 15: PCB 工作地与金属外壳直接相连是否会导致 ESD 干扰进入电路	(75)
2.2.16	案例 16: 是地上有干扰吗	(81)
<b>第 3 章 产品中电缆、连接器、接口电路与 EMC</b>		<b>(83)</b>
3.1	概论	(83)
3.1.1	电缆是系统的最薄弱环节	(83)
3.1.2	接口电路是解决电缆辐射问题的重要手段	(83)
3.1.3	连接器是接口电路与电缆之间的通道	(84)
3.1.4	PCB 之间的互连是产品 EMC 的最薄弱环节	(85)
3.2	相关案例	(87)
3.2.1	案例 17: 由电缆布线造成的辐射超标	(87)
3.2.2	案例 18: 屏蔽电缆的“Pigtail”有多大影响	(89)
3.2.3	案例 19: 屏蔽电缆屏蔽层是双端接地还是单端接地	(92)
3.2.4	案例 20: 为何屏蔽电缆接地就会导致测试无法通过	(94)
3.2.5	案例 21: 接地线接出来的辐射	(97)
3.2.6	案例 22: 使用屏蔽线一定优于非屏蔽线吗	(99)
3.2.7	案例 23: 塑料外壳连接器与金属外壳连接器对 ESD 的影响	(105)
3.2.8	案例 24: 塑料外壳连接器选型与 ESD	(107)
3.2.9	案例 25: 当屏蔽电缆屏蔽层不接地时	(108)
3.2.10	案例 26: 数码相机辐射骚扰引发的两个 EMC 设计问题	(110)
3.2.11	案例 27: 为什么 PCB 互连排线对 EMC 那么重要	(116)
3.2.12	案例 28: PCB 板间的信号互联是产品 EMC 最薄弱的环节	(123)
3.2.13	案例 29: 环路引起的辐射发射超标	(125)
3.2.14	案例 30: 注意产品内部的互连和布线	(128)
3.2.15	案例 31: 信号线与电源线混合布线的结果	(129)
3.2.16	案例 32: 电源滤波器安装要注意什么	(132)
<b>第 4 章 通过滤波与抑制提高产品 EMC 性能</b>		<b>(136)</b>
4.1	概论	(136)
4.1.1	滤波器及滤波器件	(136)
4.1.2	防浪涌电路中的元器件	(140)
4.2	相关案例	(145)
4.2.1	案例 33: 由 Hub 引起的辐射发射超标	(145)
4.2.2	案例 34: 电源滤波器的安装与传导骚扰	(149)
4.2.3	案例 35: 输出端口的滤波影响输入端口的传导骚扰	(152)
4.2.4	案例 36: 共模电感应用得当, 辐射、传导抗扰度测试问题解决	(156)
4.2.5	案例 37: 电源差模滤波的设计	(158)
4.2.6	案例 38: 电源共模滤波的设计	(162)
4.2.7	案例 39: 滤波器件是否越多越好	(168)

4.2.8	案例 40: 滤波器件布置时应该注意的问题 .....	(172)
4.2.9	案例 41: 信号上升沿对 EMI 的影响 .....	(175)
4.2.10	案例 42: 如何解决电源谐波电流超标问题 .....	(177)
4.2.11	案例 43: 接口电路中电阻和 TVS 对防护性能的影响 .....	(179)
4.2.12	案例 44: 防浪涌器件能随意并联吗 .....	(186)
4.2.13	案例 45: 浪涌保护设计要注意“协调” .....	(188)
4.2.14	案例 46: 防雷电路的设计及其元件的选择应慎重 .....	(190)
4.2.15	案例 47: 防雷器安装很有讲究 .....	(191)
4.2.16	案例 48: 如何选择 TVS 管的钳位电芯、峰值功率 .....	(193)
4.2.17	案例 49: 选择二极管钳位还是选用 TVS 保护 .....	(196)
4.2.18	案例 50: 单向 TVS 取得更好的负向防护效果 .....	(198)
4.2.19	案例 51: 注意气体放电管的弧光电压参数 .....	(201)
4.2.20	案例 52: 用半导体放电管做保护电路时并联电容对浪涌测试结果的影响 .....	(207)
4.2.21	案例 53: 浪涌保护电路设计的“盲点”不可忽略 .....	(210)
4.2.22	案例 54: 浪涌保护器件钳位电压不够低怎么办 .....	(212)
4.2.23	案例 55: 如何防止交流电源端口防雷电路产生的起火隐患 .....	(214)
4.2.24	案例 56: 铁氧体磁环与 EFT/B 抗扰度 .....	(220)
4.2.25	案例 57: 磁珠如何降低开关电源的辐射发射 .....	(222)
<b>第 5 章 旁路和去耦 .....</b>		<b>(226)</b>
5.1	概论 .....	(226)
5.1.1	去耦、旁路与储能的概念 .....	(226)
5.1.2	谐振 .....	(227)
5.1.3	阻抗 .....	(230)
5.1.4	去耦和旁路电容的选择 .....	(231)
5.1.5	并联电容 .....	(232)
5.2	相关案例 .....	(233)
5.2.1	案例 58: 电容值大小对电源去耦效果的影响 .....	(233)
5.2.2	案例 59: 芯片电流引脚上磁珠与去耦电容的位置 .....	(237)
5.2.3	案例 60: 静电放电干扰是如何引起的 .....	(241)
5.2.4	案例 61: 小电容解决困扰多时的辐射抗扰度问题 .....	(244)
5.2.5	案例 62: 金属外壳产品中空气放电点该如何处理 .....	(245)
5.2.6	案例 63: ESD 与敏感信号的电容旁路 .....	(247)
5.2.7	案例 64: 磁珠位置不当引起的浪涌测试问题 .....	(249)
5.2.8	案例 65: 旁路电容的作用 .....	(251)
5.2.9	案例 66: 光耦两端的数字地与模拟地如何接 .....	(253)
5.2.10	案例 67: 二极管与储能、电压跌落、中断抗扰度 .....	(256)
<b>第 6 章 PCB 设计与 EMC .....</b>		<b>(262)</b>
6.1	概论 .....	(262)
6.1.1	PCB 是一个完整产品的缩影 .....	(262)
6.1.2	PCB 中的环路无处不在 .....	(262)

6.1.3	PCB 中必须防止串扰的存在	(263)
6.1.4	PCB 中不但存在大量的天线而且也是驱动源	(263)
6.1.5	PCB 中的地平面阻抗对瞬态抗干扰能力有直接影响	(264)
6.2	相关案例	(265)
6.2.1	案例 68: “静地”的作用	(265)
6.2.2	案例 69: PCB 布线形成的环路造成 ESD 测试时复位	(270)
6.2.3	案例 70: PCB 布线不合理造成网口雷击损坏	(274)
6.2.4	案例 71: 如何处理共模电感两边的“地”	(275)
6.2.5	案例 72: PCB 中铺“地”和“电源”要避免耦合	(278)
6.2.6	案例 73: 数/模混合器件数字地与模拟地如何接	(283)
6.2.7	案例 74: PCB 布线宽度与浪涌测试电流大小的关系	(286)
6.2.8	案例 75: 如何避免晶振的噪声带到电缆口	(289)
6.2.9	案例 76: 地址线噪声引起的辐射发射	(291)
6.2.10	案例 77: 环路引起的干扰	(294)
6.2.11	案例 78: PCB 层间距设置与 EMI	(299)
6.2.12	案例 79: 布置在 PCB 边缘的敏感线为何容易受 ESD 干扰	(303)
6.2.13	案例 80: 减小串联在信号线上的电阻可通过测试	(306)
6.2.14	案例 81: 数/模混合电路的 PCB 设计详细解析案例	(308)
6.2.15	案例 82: 晶振为什么不能放置在 PCB 边缘	(321)
6.2.16	案例 83: 强辐射器中下方为何要布置局部地平面	(325)
6.2.17	案例 84: 接口电路布线与抗 ESD 干扰能力	(327)
第 7 章	器件、软件与频率抖动技术	(330)
7.1	器件、软件与 EMC	(330)
7.2	频率抖动技术与 EMC	(331)
7.3	相关案例	(331)
7.3.1	案例 85: 器件 EMC 特性和软件对系统 EMC 性能的影响不可小视	(331)
7.3.2	案例 86: 软件与 ESD 抗扰度	(333)
7.3.3	案例 87: 频率抖动技术带来的传导骚扰问题	(334)
7.3.4	案例 88: 电压跌落与中断测试引出电路设计与软件问题	(340)
附录 A	EMC 术语	(341)
附录 B	民用、工科医、铁路等产品相关标准中的 EMC 测试	(343)
附录 C	汽车电子、电气零部件的 EMC 测试	(359)
附录 D	军用标准中的常用 EMC 测试	(382)
附录 E	EMC 标准与认证	(403)

# 第 1 章

## EMC 基础知识及 EMC 测试实质

### 1.1 什么是 EMC

EMC (Electro Magnetic Compatibility, 电磁兼容) 是指电子、电气设备或系统在预期的电磁环境中, 按设计要求正常工作的能力。它是电子、电气设备或系统的一种重要的技术性能, 包括以下三方面的含义。

(1) EMI (Electro Magnetic Interference, 电磁干扰), 即处在一定环境中的设备或系统, 在正常运行时, 不应产生超过相应标准所要求的电磁能量, 相对应的测试项目根据产品类型及标准的不同而不同, 对于民用、工科医、铁路产品, 基本的 EMI 测试项目如下。

- 电源线传导骚扰 (CE) 测试;
- 信号、控制线传导骚扰 (CE) 测试;
- 辐射骚扰 (RE) 测试;
- 谐波电流 (Harmonic) 测量;
- 电压波动和闪烁 (Fluctuation and Flicker) 测量。

对于军用产品, 基本的 EMI 测试项目如下。

- CE101 测试: 15 Hz~10 kHz 电源线传导发射测试;
- CE102 测试: 10 kHz~10 MHz 电源线传导发射测试;
- CE106 测试: 10 kHz~40 GHz 天线端子传导发射测试;
- CE107 测试: 电源线尖峰信号 (时域) 传导发射测试;
- RE101 测试: 25 Hz~100 kHz 磁场辐射发射测试;
- RE102 测试: 10 kHz~18 GHz 电场辐射发射测试;
- RE103 测试: 10 kHz~40 GHz 天线谐波和乱真输出辐射发射测试。

对于汽车及车载电子、电气产品, 基本的 EMI 测试项目如下。

- 汽车整车辐射发射测试;
- 车载电子、电气零部件/模块的传导骚扰测试;
- 车载电子、电气零部件/模块的辐射发射测试;
- 车载电子、电气零部件/模块的瞬态发射骚扰测试。

注: 本书中, 传导骚扰即为传导发射; 辐射骚扰即为辐射发射。

(2) EMS (Electro Magnetic Susceptibility, 电磁抗扰度): 即处在一定环境中的设备或系统, 在正常运行时, 设备或系统能承受相应标准规定范围内的电磁能量干扰, 相对应的测试项目也根据产品类型及标准的不同而不同, 对于民用、工科医、铁路产品, 基本的 EMS 测试项目如下。

- 静电放电抗扰度 (ESD);
- 电快速瞬变脉冲群抗扰度 (EFT);
- 浪涌 (SURGE);
- 辐射抗扰度 (RS);
- 传导抗扰度 (CS);
- 电压跌落与中断 (DIP)。

对于军用产品,基本的EMS测试项目如下。

- CS101 测试: 25 Hz~50 kHz 电源线传导敏感度测试;
- CS103 测试: 15 kHz~10 GHz 天线端子互调传导敏感度测试;
- CS104 测试: 25 Hz~20 GHz 天线端子无用信号抑制传导敏感度测试;
- CS105 测试: 25 Hz~20 GHz 天线端子交调传导敏感度测试;
- CS106 测试: 电源尖峰信号传导敏感度测试;
- CS109 测试: 50 Hz~100kHz 壳体电流传导敏感度;
- CS112 测试: 静电放电敏感度;
- CS114 测试: 10 kHz~400 MHz 壳体电流传导敏感度电缆束注入传导敏感度测试;
- CS115 测试: 电缆束注入脉冲激励传导敏感度测试;
- CS116 测试: 10 kHz~100 MHz 电缆和电源线阻尼正弦瞬变传导敏感度测试;
- RS101 测试: 25 Hz~100 kHz 磁场辐射敏感度测试;
- RS103 测试: 10 kHz~40 GHz 电场辐射敏感度测试;
- RS105 测试: 瞬变电磁场辐射敏感度测试。

对于汽车及车载电子、电气零部件产品,基本的EMS测试项目如下。

- 符合 ISO 7637-1/2 标准规定的电源线传导耦合/瞬态抗扰度测试;
- 符合 ISO 7637-3 标准规定的传感器电缆与控制电缆传导耦合/瞬态抗扰度测试;
- 符合 ISO 11452-7 (对应国标为 GB 17619) 标准规定的射频传导抗扰度测试;
- 符合 ISO 11452-2 (对应国标为 GB 17619) 标准规定的辐射场抗扰度测试;
- 符合 ISO 11452-3 (对应国标为 GB 17619) 标准规定的横电磁波 (TEM) 小室的辐射场抗扰度测试;
- 符合 ISO 11452-4 (对应国标为 GB 17619) 标准规定的大电流注入 (BCI) 抗扰度测试;
- 符合 ISO 11452-5 (对应国标为 GB 17619) 标准规定的带状线抗扰度测试;
- 符合 ISO 11452-6 (对应国标为 GB 17619) 标准规定的三平板抗扰度测试;
- 符合 ISO 10605 标准的静电放电抗扰度测试。

(3) 电磁环境: 系统或设备的工作环境。

## 1.2 传导、辐射与瞬态

开空调时,室内的荧光灯会出现瞬间变暗的现象,这是因为大量电流流向空调,电压急速下降,利用同一电源的荧光灯受到影响。还有使用吸尘器时收音机会出现“啪啦,啪啦”的杂音。原因是吸尘器的马达产生的微弱(低强度高频的)电压/电流变化通过电源线传递进入收音机,以杂音的形式表现出来。这种由一个设备中产生的电压/电流通过电源线、信号线传导并影响其他设备时,将这个电压/电流的变化称为“传导干扰”。所以,为对症下药

药,通常采用的方法是给发生源及被干扰设备的电源线等安装滤波器,阻止传导干扰的传输。另外,当信号线上出现噪声时,将信号线改为光纤,也可隔断传输途径。

当在使用手机时,旁边的计算机显示器图像会出现抖动,这是因为手机工作时的信号通过空间以电磁场的形式传输到显示器内部电路。当摩托车从附近道路通过时,车载收音机出现杂音,这是因为摩托车点火装置的脉冲电流产生了电磁波,传到空间再传给附近的收音机天线、电路上,产生了干扰电压/电流。像这种通过空间传播,并对其他设备电路产生无用电压/电流、造成危害的干扰称为“辐射干扰”。辐射现象的产生必然存在着天线与源。由于传播途径是空间,屏蔽也是解决辐射干扰的有效方法。

如上所述,干扰的根源是电压/电流产生不必要的变化,这种变化通过导线直接传递给其他设备,造成危害,称为“传导干扰”。另外,由于电压/电流变化而产生的电磁波通过空间传播到其他设备中,在电路或导线上产生不必要的电压/电流,并造成危害的干扰称为“辐射干扰”。但是,实际上并不能这样简单区分。

例如,计算机等计算设备的骚扰源,虽然是在设备内部电路上流动的数字信号的电压/电流,但这些干扰以传导干扰的方式通过电源线或信号线泄漏,直接传递给其他设备。同时这些导线产生的电磁波以辐射干扰的形式危及附近的设备。而且计算设备本身内部电路也产生电磁波,以辐射的形式危及其他设备。

辐射干扰现象的产生总是与天线密不可分的,根据天线原理,如果导线的长度与波长相等,则容易产生电磁波。例如,数米长的电源线会产生 VHF 频带(30~300 MHz)的辐射发射。在比此频率低的频带内,因波长较长,当电源线中流过同样的电流时,不会辐射太强的电磁波。所以在 30 MHz 以下的低频带主要是传导干扰。但是,伴随着传导干扰会在电源线周围产生干扰磁场,给 AM 广播等带来干扰。另外,如前所述,由于在 VHF 宽带内电源线泄漏的干扰能转变成电磁波扩散到空间,因此辐射干扰成为比传导干扰更主要的问题。在比此更高的频率上,比电源线尺寸更小的设备内部电路会产生辐射干扰,危害其他设备。

总而言之,当设备和导线的长度比波长短时,主要问题是传导干扰,当它们的尺寸比波长长时,主要问题是辐射干扰。

环境中还存在着一些短暂的高能脉冲干扰,这些干扰对电子设备的危害很大,一般称这种干扰为瞬态干扰。瞬态干扰既可以通过电缆进入设备,也可以以宽带辐射干扰的形式对设备造成影响。例如,汽车点火系统和直流电动机电刷对收音机的干扰。产生瞬态干扰的原因主要有:雷电、静电放电、电力线上的负载通断(特别是感性负载)、核电磁脉冲等。可见瞬态干扰是指时间很短但幅度较大的电磁干扰。常见的瞬态干扰(设备需要通过测试验证抗扰度)有三种:各类电快速脉冲瞬变(EFT)、各类浪涌(SURGE)、静电放电(ESD)等。

## 1.3 理论基础

### 1.3.1 时域与频域

任何信号都可以通过傅里叶变换建立其时域与频域的关系,如下式所示:

$$H(f) = \int_0^T x(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (1.1)$$

式中, $x(t)$ 是电信号的时域波形函数; $H(f)$ 是该信号的频率函数, $2\pi f = \omega$ , $\omega$ 是角频率; $f$ 是



频率。

梯形脉冲函数的频谱如图 1.1 所示，由主瓣与无数个副瓣组成，每个副瓣虽然也有最大值，但是总的趋势是随着频率的增高而下降，上升时间为  $t_r$ ，宽度为  $t$  的梯形脉冲频谱峰值包含有两个转折点，一个是  $1/\pi t$ ，另一个是  $1/\pi t_r$ 。频谱幅度低频端是常数，经第一个转折点以后以  $-20\text{ dB}/10$  倍频程下降，经第二转折点以后以  $-40\text{ dB}/10$  倍频程下降。所以当进行电路设计时在保证正常功能的情况下，尽可能增加上升时间和下降时间，有助于减小高频噪声。但是由于第一个转折点的存在，使那些即使上升沿很陡、而频率较低的周期信号也不会具有较高电平的高次谐波噪声（注：关于各次谐波的幅度估算，参考书籍《电子产品设计 EMC 风险评估》）。

周期信号由于每个取样段的频谱都是一样的，所以它的频谱呈离散形，但在各个频点上呈强度大的特点，通常被称为窄带噪声。而非周期信号，由于其每个取样段的频谱不一样，所以其频谱很宽，而且强度较弱，通常被称为宽带噪声。在一般的系统中，时钟信号为周期信号，而数据线和地址线通常为非周期信号，因此造成系统辐射发射超标的原因通常是时钟信号。时钟噪声与数据噪声频谱如图 1.2 所示。

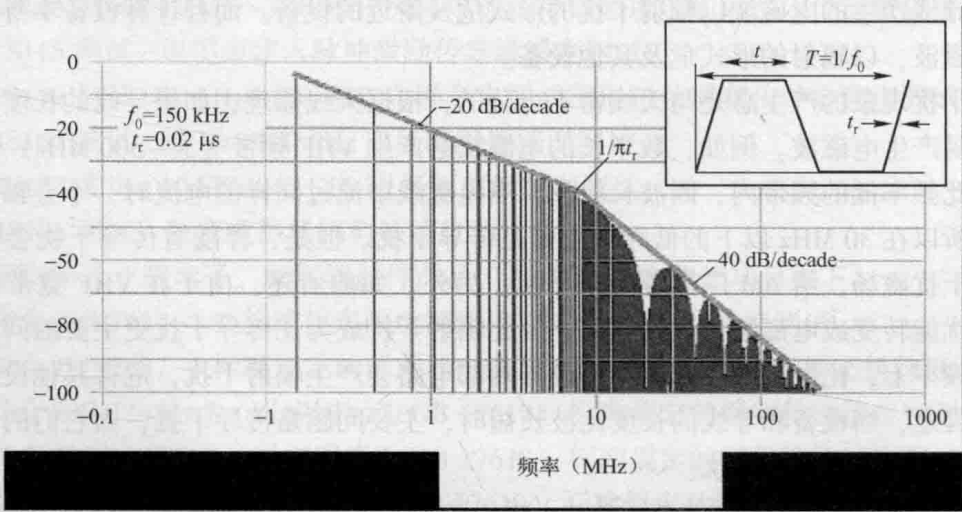


图 1.1 梯形脉冲函数的频谱

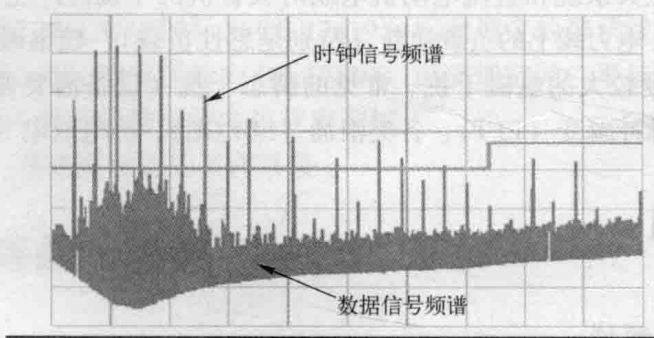


图 1.2 时钟噪声与数据噪声频谱

### 1.3.2 电磁骚扰单位分贝 (dB) 的概念

电磁骚扰通常用分贝来表示，分贝的原始定义为两个功率的比，如图 1.3 所示，dB 是