

电磁兼容技术系列

EMC 电磁兼容

设计与测试案例分析

© 郑军奇 编著

(第2版)



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

内 容 简 介

本书以 EMC 案例分析为主线,通过案例描述、分析来介绍产品设计中的 EMC 技术,向读者介绍产品设计过程中有关 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。

本书是以实用为目的,以具有代表性的案例来说明复杂的原理,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. —2 版. —北京:电子工业出版社,2010.1

(电磁兼容技术系列)

ISBN 978-7-121-09850-5

I. E… II. 郑… III. 电磁兼容性—设计 IV. TN02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 203612 号

责任编辑:张 榕

印 刷: 北京京师印务有限公司

装 订:

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:24 字数:650 千字

印 次:2010 年 1 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:59.00 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 zllts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

第2版序言

《EMC(电磁兼容)设计与测试案例分析》在2006年出版以来,受到了广大读者的关注,同时在这两年的时间内也发现了本书不少缺陷,本书修改了第一版的不少缺陷,并且在原来已有案例分析的基础上,通过案例进一步澄清了以下几个重要的EMC设计要点的原理及具体处理措施。

- (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) 澄清了电源端口滤波电路设计方法,包括滤波电路的选择,滤波元件参数的选择;
- (3) 澄清了数模混合电路的EMC设计方法,不但澄清了数模混合电路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) 澄清了对PCB中地平面进行分地的优缺点;
- (5) 澄清了金属外壳产品PCB中各种工作地与金属外壳之间的互连的方法与原理,涉及两者之间要不要连?如何连?怎么连?在哪里连?等问题;
- (6) 澄清了PCB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,并澄清了具体的解决与弥补措施;
- (7) 澄清了多层PCB设计时的层叠设计与EMC问题;
- (8) 澄清环路引起的差模辐射量级。

中国EMC起步较晚,但是发展较快,经过几年的发展,越来越多的企业及其工程师已经渐渐了解了EMC,也逐渐掌握了一些EMC设计规则,并用以指导产品的设计。然而,在电子技术飞速发展的中国,在产品的设计过程中,还存在许多对EMC本质问题的误解。消除这些误解才能帮助读者解决不可避免的EMC难题,这些误解主要体现在:

“接地”“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,最终需要把产品的某个金属导体接入“大地”(称为“保护地”),即自然界的地球中(通常通过建筑物中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,需要把产品接自然界的地球吗?如何正确理解EMC中的“接地”?案例14《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》、案例13《金属外壳屏蔽反而导致EMI测试失败》和案例69《数模混合电路的PCB设计详细解析案例》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的骚扰源的参考点是PCB中工作地上的某一点,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中工作地上的某一点,可见,这种“接地”从EMI骚扰的流向看,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”的目的是为了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,以上的两种“接地”都可以借助于金属外壳或其他寄生参数很好的实现,这就是金属外壳设备为什么更容易通过 EMC 测试原因,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。

[环路与差模辐射] 产品中辐射是如何产生的? PCB 中的信号环路会产生差模辐射,这是无可争议的事实。公式 $E(\mu\text{V}/\text{m}) = 1.3 \times I(\text{A}) \cdot S(\text{cm}^2) \cdot F(\text{MHz})/D(\text{m})$

给出了这种差模辐射的量级,其中:

$E(\mu\text{V}/\text{m})$:辐射强度,单位为 $\mu\text{V}/\text{m}$;

$I(\text{A})$:环路中一定频率下的电流强度,单位为 A;

$S(\text{cm}^2)$:信号环路面积,单位为 cm^2 ;

$F(\text{MHz})$:环路中产生辐射的信号频率,单位为 MHz;

$D(\text{m})$:测试点到环路的距离,单位为 m。

根据这个公式,假设一个时钟信号的电压幅度为 3.3 V,频率为 20 MHz(工作电流为 $3.3\text{V}/100\Omega = 33\text{mA}$,3 次谐波 60 MHz 的电流分量有效值为 0.005 A),环路面积为 $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ (通常认为这是一个很差的 PCB 设计),这个时钟环路在其谐波频率 60 MHz、3 m 处所产生的辐射强度为 $7\mu\text{V}/\text{m}$,这是一个远比标准规定的辐射发射限值小的辐射值。也就是说,当环路面积还没有达到很大时(随着多层板技术的普及引用,环路面积远可以设计得更小),这种辐射不会超过当今 EMC 标准所规定的辐射限值。但是值得注意的是,环路面积增加,随之带来的共模辐射问题,案例 25:《环路引起的辐射发射超标》给出了一种分析。因此,不要过分地强调差模辐射,而忽略了更为重要的共模辐射。

[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,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 做任何连接。但是,随着以上误解的消除,并且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),这时,这种金属外壳“屏蔽”的必要性也逐渐下降,案例 13《金属外壳屏蔽反而导致 EMI 测试失败》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,想要这种路径变得更为直接,就需要考虑 PCB 与金属外壳之间做合理的互连。设计人员必须消除这种误解,当你有意为你的产品增加“屏蔽”时,你必须对此“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”物理位置,如果不能将其也屏蔽在内,那么就必须要考虑 PCB 与金属外壳之间做合理的互连,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器件。电感会产生感抗,并随频率增大而增大;电容会产生容抗,并随频率增大而减小。当原来的电路中串入一个电感,或并联一个电容,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:“多串联一个电感或多并联一个电容或多或少是会有好处的”。事实上,电感、电容作为储能元器件,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的表现就是谐振。如 LC 滤波电路发生谐振发生时,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,就必须消除这种误解,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。

编著者

前 言

国内市场上大部分的 EMC 书籍存在的一个缺陷就是设计与测试脱节。谈论 EMC 设计与方法需要建立在 EMC 测试的基础上,不仅是因为 EMC 设计的第一道门槛就是 EMC 测试,更重要的是那些只有在 EMC 测试中才会存在的 EMC 关键因素,如干扰源、接受天线、等效发射天线等,这些都是 EMC 问题分析中不可缺少的一部分。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;又如典型的抗扰度测试,EFT/B 测试、BCI 测试、ESD 测试,它们是一种典型的共模抗扰度测试,干扰源是一种共模干扰,相对于参考接地板的干扰,也就是说这些干扰源的参考点是进行这些测试时的参考接地板,这就意味着这种干扰所产生的电流最终要回到参考接地板,这是分析这类干扰问题的基本出发点。设想一下,对于以上所说的传导骚扰测试来说,如果你的产品在测试时,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,这种干扰所造成的电流如果没有经过你的产品电路,那肯定对于这个产品通过这些 EMC 测试是非常有利的,这就是产品设计时所要考虑的。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》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 设计方法的一本工程参考用书。实践性与理论性的高度结合是本书的最大特点。本书共分 7 章,其中第 1 章描述 EMC 知识,主要是为第 2~8 章服务。当读者在阅读这些章节时,如果对一些基本感念比较模糊,则可以方便地查阅。第 2~7 章部分是案例部分,涉及的 EMC 案例有典型性和代表性。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,减少设计人员在产品的设计与 EMC 问题诊断中的误区,使产品达到良好的 EMC 性。同时通过案例说明 EMC 的设计原理,使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。

(1) 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的频率日益提高,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,接地不仅有助于解决安全问题,同样对 EMC 也相当重要,许多 EMC 问题是不合理的接地设计造成的,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,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。

(2) 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的通道,因为它们长度的原因,电缆不仅是“发射天线”,同时也是良好的“接收天线”。与电缆有着最直接关系的,无非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,而且也同样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。

(3) 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。

(4) 旁路、去耦与储能：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，去耦将提供给元器件在时钟和数据变化期间正常工作的足够的动态电压和电流。去耦是通过在信号线和电源平面间提供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，这时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的选择。

(5) 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 中线路布线，都会对产品整体的 EMC 性能产生本质的影响。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 性具有重要的意义。PCB 设计的目的就是减小 PCB 上的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。

(6) 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、引脚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。软件虽然不是属于 EMC 学术范畴，但是有些情况下，利用软件提供的容错技术，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。本章节中的案例将详细说明频率抖动技术的实质及注意事项。

其实 EMC 设计规范犹如交通法规，不遵守不一定会出交通事故，但是风险必然加大，EMC 设计也是一样，有些规则不遵守也许也能在测试中过关，但是过关的风险必然加大，所以在产品设计中有必要引入风险的意识，EMC 设计的目的是最大限度地降低 EMC 测试风险，只有遵守所有的 EMC “交通规则”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作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。这些案例是作者积累的大量 EMC 案例中的几个典型，每一个案例的结果都形成了一个或多个的 EMC 设计规则，这是值得借鉴与参考的。由于作者所从事产品的限制，也许不能包含各类电子、电气产品的 EMC 问题，同时也可能由于作者知识的不全面性，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。另外，需要说明的是，书中案例均取自具体产品，为方便广大读者，其中的元器件符号、代号、图形等并未按国标进行标准化处理。

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；同时还要感谢倪坚博士，以及对本书提过宝贵意见的各位同仁；另外也要感谢电子工业出版社的副编审张榕及其同事们。

编著者

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: 传导骚扰与接地	(31)
2.2.2 案例 2: 传导骚扰测试中应该注意的接地环路	(36)
2.2.3 案例 3: 屏蔽体外的辐射从哪里来	(38)
2.2.4 案例 4: “悬空”金属与辐射	(40)
2.2.5 案例 5: 伸出屏蔽体的“悬空”螺柱造成的辐射	(43)
2.2.6 案例 6: 屏蔽材料的压缩量与屏蔽性能	(46)
2.2.7 案例 7: 开关电源中变压器初、次级线圈之间的屏蔽层对 EMI 作用有多大	(49)
2.2.8 案例 8: 金属外壳接触不良与系统复位	(54)
2.2.9 案例 9: 静电放电与螺钉	(55)
2.2.10 案例 10: 散热器与 ESD 也有关系	(56)
2.2.11 案例 11: 怎样接地才有利于 EMC	(57)

2.2.12	案例 12: 散热器形状影响电源端口传导发射	(61)
2.2.13	案例 13: 金属外壳屏蔽反而导致 EMI 测试失败	(65)
2.2.14	案例 14: 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	(71)
2.2.15	案例 15: 数/模混合器件数字地与模拟地如何接	(76)
第 3 章 产品中电缆、连接器、接口电路与 EMC		(80)
3.1	概论	(80)
3.1.1	电缆是系统的最薄弱环节	(80)
3.1.2	接口电路是解决电缆辐射问题的重要手段	(80)
3.1.3	连接器是接口电路与电缆之间的通道	(81)
3.1.4	PCB 之间的互连是产品 EMC 的最薄弱环节	(82)
3.2	相关案例	(84)
3.2.1	案例 16: 由电缆布线造成的辐射超标	(84)
3.2.2	案例 17: 屏蔽电缆“Pigtail”有多大影响	(86)
3.2.3	案例 18: 接地线接出来的辐射	(89)
3.2.4	案例 19: 使用屏蔽线一定优于非屏蔽线吗	(92)
3.2.5	案例 20: 塑料外壳连接器与金属外壳连接器对 ESD 的影响	(98)
3.2.6	案例 21: 塑料外壳连接器选型与 ESD	(100)
3.2.7	案例 22: 当屏蔽电缆的屏蔽层不接地时	(101)
3.2.8	案例 23: 数码相机辐射骚扰问题引发的两个 EMC 设计问题	(103)
3.2.9	案例 24: 为什么 PCB 互连排线对 EMC 那么重要	(109)
3.2.10	案例 25: 环路引起的辐射发射超标	(116)
3.2.11	案例 26: 注意产品内部的互连和布线	(119)
3.2.12	案例 27: 信号线与电源线混合布线的结果	(120)
3.2.13	案例 28: 电源滤波器安装要注意什么	(123)
第 4 章 通过滤波与抑制提高产品 EMC 性能		(127)
4.1	概论	(127)
4.1.1	滤波器及滤波器件	(127)
4.1.2	防浪涌电路中的元器件	(131)
4.2	相关案例	(136)
4.2.1	案例 29: 由 Hub 引起的辐射发射超标	(136)
4.2.2	案例 30: 电源滤波器的安装与传导骚扰	(140)
4.2.3	案例 31: 输出端口的滤波影响输入端口的传导骚扰	(143)
4.2.4	案例 32: 共模电感应用得当, 辐射、传导抗扰度测试问题解决	(147)
4.2.5	案例 33: 电源差模滤波的设计	(149)
4.2.6	案例 34: 电源共模滤波的设计	(153)
4.2.7	案例 35: 滤波器件是否越多越好	(159)
4.2.8	案例 36: 滤波器件布置时应该注意的事件	(163)
4.2.9	案例 37: 如何解决电源谐波电流超标	(166)
4.2.10	案例 38: 接口电路中电阻和 TVS 对防护性能的影响	(168)
4.2.11	案例 39: 防浪涌器件能随意并联吗	(175)

4.2.12	案例 40: 浪涌保护设计要注意“协调”	(177)
4.2.13	案例 41: 防雷电路的设计及其元件的选择应慎重	(179)
4.2.14	案例 42: 防雷器安装很有讲究	(180)
4.2.15	案例 43: 如何选择 TVS 管的钳位电芯, 峰值功率	(182)
4.2.16	案例 44: 选择二极管钳位还是选用 TVS 保护	(185)
4.2.17	案例 45: 铁氧体磁环与 EFT/B 抗扰度	(187)
4.2.18	案例 46: 磁珠如何降低开关电源的辐射发射	(189)
第 5 章 旁路和去耦		(194)
5.1	概论	(194)
5.1.1	去耦、旁路与储能的概念	(194)
5.1.2	谐振	(195)
5.1.3	阻抗	(198)
5.1.4	去耦和旁路电容的选择	(199)
5.1.5	并联电容	(200)
5.2	相关案例	(201)
5.2.1	案例 47: 电容值大小对电源去耦效果的影响	(201)
5.2.2	案例 48: 芯片电流引脚上磁珠与去耦电容的位置	(205)
5.2.3	案例 49: 静电放电干扰是如何引起的	(209)
5.2.4	案例 50: 小电容解决困扰多时的辐射抗扰度问题	(212)
5.2.5	案例 51: 金属外壳产品中空气放电点该如何处理	(213)
5.2.6	案例 52: ESD 与敏感信号的电容旁路	(215)
5.2.7	案例 53: 磁珠位置不当引起的浪涌测试问题	(217)
5.2.8	案例 54: 旁路电容的作用	(219)
5.2.9	案例 55: 光耦两端的数字地与模拟地如何接	(221)
5.2.10	案例 56: 二极管与储能、电压跌落、中断抗扰度	(224)
第 6 章 PCB 设计与 EMC		(230)
6.1	概论	(230)
6.1.1	PCB 是一个完整产品的缩影	(230)
6.1.2	PCB 中的环路无处不在	(230)
6.1.3	PCB 中必须防止串扰的存在	(231)
6.1.4	PCB 中不但存在大量的天线而且也是驱动源	(231)
6.1.5	PCB 中的地平面阻抗与瞬态抗干扰能力有直接影响	(232)
6.2	相关案例	(233)
6.2.1	案例 57: “静地”的作用	(233)
6.2.2	案例 58: PCB 布线形成的环路造成 ESD 测试时复位	(238)
6.2.3	案例 59: PCB 布线不合理造成网口雷击损坏	(242)
6.2.4	案例 60: 共模电感两边的“地”如何处理	(243)
6.2.5	案例 61: PCB 中铺“地”和“电源”要避免耦合	(246)
6.2.6	案例 62: PCB 布线宽度与浪涌测试电流大小的关系	(251)
6.2.7	案例 63: 如何避免晶振的噪声带到电缆口	(253)

16.2.8	案例 64: 地址线噪声引起的辐射发射	(255)
16.2.9	案例 65: 环路引起的干扰	(258)
16.2.10	案例 66: PCB 层间距设置与 EMI	(263)
16.2.11	案例 67: 布置在 PCB 边缘的敏感线为何容易受 ESD 干扰	(268)
16.2.12	案例 68: 减小串联在信号线上的电阻可通过测试	(271)
16.2.13	案例 69: 数模混合电路的 PCB 设计详细解析案例	(272)
16.2.14	案例 70: 晶振为什么不能放置在 PCB 边缘	(286)
16.2.15	案例 71: 强辐射器中下方为何要布置局部地平面	(290)
16.2.16	案例 72: 接口电路布线与抗 ESD 干扰能力	(292)
第 7 章 器件、软件与频率抖动技术		(295)
7.1	器件、软件与 EMC	(295)
7.2	频率抖动技术与 EMC	(296)
7.3	相关案例	(296)
7.3.1	案例 73: 器件 EMC 特性和软件对系统 EMC 性能的影响不可小视	(296)
7.3.2	案例 74: 软件与 ESD 抗扰度	(298)
7.3.3	案例 75: 频率抖动技术带来的传导骚扰问题	(299)
7.3.4	案例 76: 电压跌落与中断测试引出电路设计与软件问题	(305)
附录 A EMC 术语		(306)
附录 B 民用、工科医、铁路等产品相关标准中的 EMC 测试		(308)
附录 C 汽车电子、电气零部件的 EMC 测试		(324)
附录 D 军用标准中的常用 EMC 测试		(342)
附录 E EMC 标准与认证		(363)

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, 其包括三方面的含义:

(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不同而不同, 对于民用、工科医、铁路产品, 基本的 EMI 测试项目有:

- 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 测试项目有:

- 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 测试项目有:

- 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不同而不同, 对于民用、工科医、铁路产品, 基本的 EMS 测试项目有:

- 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测试项目有:

- 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;
- 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测试项目有:

- 符合 ISO7637 - 1/2 标准规定的电源线传导耦合/瞬态抗扰度测试;
 - 符合 ISO7637 - 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 ISO11452 - 7 (对应国标为 GB17619) 标准规定的射频传导抗扰度测试;
 - 符合 ISO11452 - 2 (对应国标为 GB17619) 标准规定的辐射场抗扰度测试);
 - 符合 ISO11452 - 3 (对应国标为 GB17619) 标准规定的横电磁波 (TEM) 小室的辐射场抗扰度测试);
 - 符合 ISO11452 - 4 (对应国标为 GB17619) 标准规定的大电流注入 (BCI) 抗扰度测试);
 - 符合 ISO11452 - 5 (对应国标为 GB17619) 标准规定的带状线抗扰度测试);
 - 符合 ISO11452 - 6 (对应国标为 GB17619) 标准规定的三平板抗扰度测试);
 - 符合 ISO10605 标准的静电放电抗扰度测试。
- (3) 电磁环境: 即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,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 CRT 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 CRT 显示器内部。当摩托车从附近道路通过时，电视会出现雪花状干扰。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电视天线、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分不开的，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 (1.1) 中的 $x(t)$ 是电信号的时域波形函数； $H(f)$ 是为该信号的频率函数， $2\pi f = \omega$ ， ω 是角频率； f 为频率。

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,经第二转折点后以 $-40\text{ dB}/10$ 倍频程下降。所以在电路设计时在保证逻辑正常功能情况下,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,通常成为窄带噪声。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。

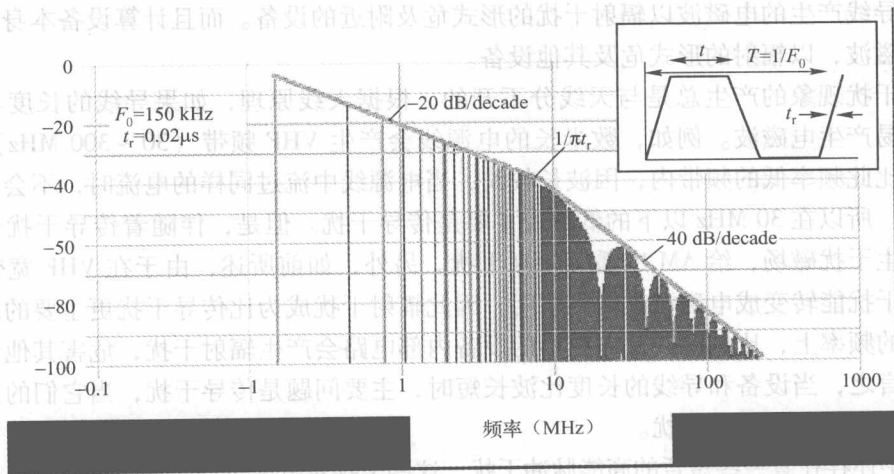


图 1.1 梯形脉冲函数的频谱

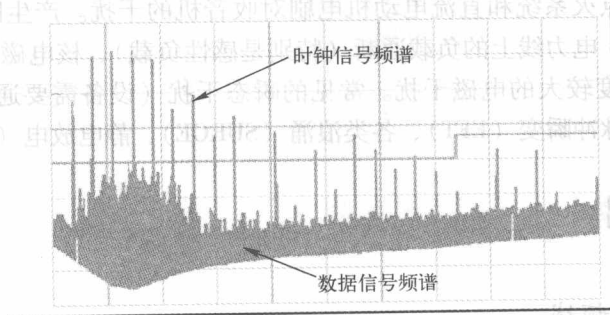


图 1.2 时钟噪声与数据噪声频谱

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 是两个功率值的比较值去对数后再乘以 10。

通常用 dBm 表示功率的单位, dBm 即是功率相对于 1 mW 的值,如图 1.4 所示。

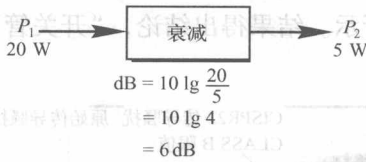


图 1.3 分贝的概念

dBm = 功率比 = 相对于 1 mV 的比值

dBm = 10 lg (P(watts) / 0.001)



图 1.4 功率值的分贝

由功率的分贝值可以推出电压的分贝值 (前提条件是: $R_1 = R_2$; 通常为 50Ω), 如图 1.5 所示。

在 EMC 领域中, 通常用 dB μ V 直接表示电压的大小, dB μ V 即是电压相对与 1 μ V, 如图 1.6 所示。

功率 (W) = $\frac{U^2}{R}$ 功率 P_1 和 P_2 分别是:

$P_1 = \frac{(U_1)^2}{R_1}$ and $P_2 = \frac{(U_2)^2}{R_2}$

$dB = 10 \lg \frac{(U_1)^2}{(U_2)^2}$

$dB = 20 \lg \frac{(U_1)}{(U_2)}$

图 1.5 电压分贝的概念

$dB\mu V = 20 \lg \frac{U(\text{volts})}{10^{-6}}$

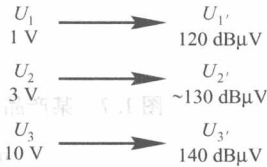


图 1.6 电压值的分贝

举个例子: 对于辐射骚扰通常用电磁场的大小来衡量, 其单位是 V/m。在 EMC 领域通常以分别的单位表示即 dB μ V/m。用天线和干扰测试仪器组合在一起测量骚扰场强的大小, 干扰测量仪器测到的是天线端口的电压, 此电压加上所用天线的天线系数就为被测骚扰的场强。

$E [dB\mu V/m] = U [dB\mu V] + \text{天线系数} [dB]$

注: 不计电缆衰减。

1.3.3 正确理解分贝真正的含义

当设备的电磁骚扰不能满足有关 EMC 标准规定的限值时, 就要对设备产生超标发射的原因进行分析, 然后进行排除。在这个过程中, 经常发现许多人经过长时间的努力, 仍然没有排除故障。造成这种情况的一种原因是诊断工作陷入了“死循环”。这种情况可以用下面的例子说明。

假设一个系统在测试时出现了传导骚扰超标, 使系统不能满足 EMC 标准 CISPR22 中对传导骚扰的 CLASS B 限值, 如图 1.7 所示。经过初步分析, 原因可能有 4 个, 它们分别是:

- (1) “变压器”问题产生的传导骚扰;
- (2) 电源中“开关管”产生的传导骚扰;
- (3) “PCB”设计缺陷产生的传导骚扰;
- (4) “辅助设备”产生的传导骚扰。

在诊断时, 首先将与“变压器”有关的因素去除, 以减小传导骚扰, 结果发现测试的结果并没有明显减小, 去掉“变压器”有关因素后的电源端口传导骚扰的组成和水平如图 1.8 所示。于是认为“变压器”不是一个导致传导骚扰超标的主要原因, 将“变压器”的改动撤销。再对电源中的“开关管”进行处理, 去除其对电源端口传导骚扰不利的因素,

结果发现频谱仪屏幕上显示的信号(测量结果)还没有明显减小,去掉“开关管”有关因素后的电源端口传导骚扰的组成和水平如图 1.9 所示。结果得出结论,“开关管”也不是主要导致电源端口传导骚扰超标的主要原因。

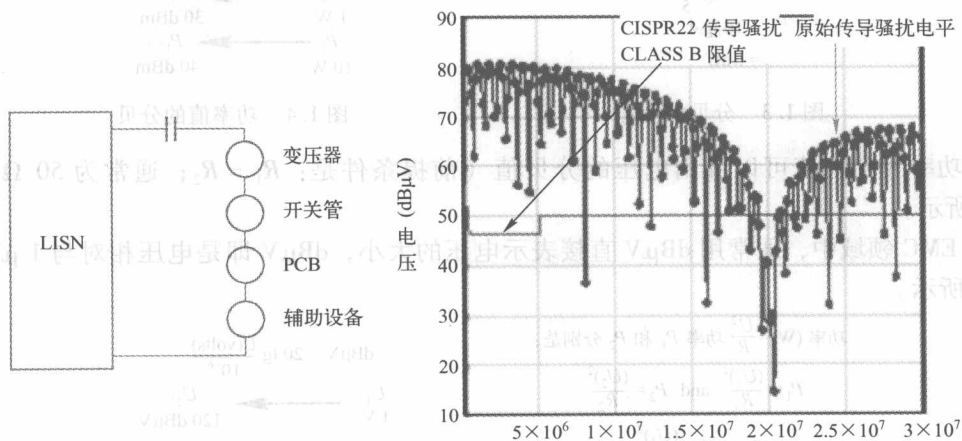


图 1.7 某产品电源端口传导骚扰的组成和水平

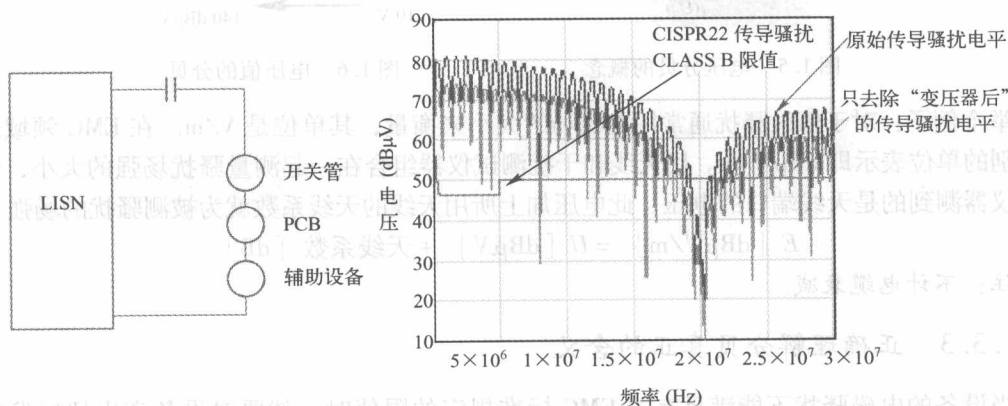


图 1.8 去掉“变压器”有关因素后的电源端口传导骚扰的组成和水平

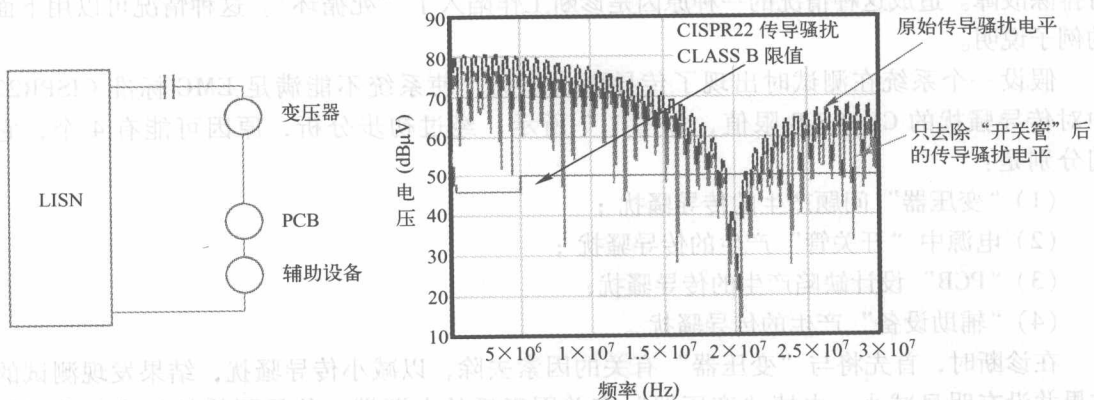


图 1.9 去掉“开关管”有关因素后的电源端口传导骚扰的组成和水平