

电磁兼容技术系列

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

# 电子产品设计

# EMC

## 风险评估

郑军奇 编著



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

电磁兼容技术系列

# 电子产品设计 EMC 风险评估

郑军奇 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书从电子和电气产品设计的角度出发,讲述一种实用的 EMC 分析方法,避免理论化问题,可以系统地指导开发人员开发产品。这种方法还可以与电子产品的开发流程融合在一起,通过 EMC 分析的每个步骤,指出产品设计的 EMC 风险,并给出解决方案或改进建议,以提高产品 EMC 测试的通过率,降低产品开发成本。正确使用该方法,在产品第一轮设计时 EMC 测试通过率为 90%~100%,第二轮设计时 EMC 测试通过率达 100%。本书以实用为目的,内容丰富,深入浅出,通俗易懂,可以作为电子产品设计部门的参考书,也可以作为结构、电子电气、PCB layout、硬件测试、质量、系统、EMC 设计、EMC 测试、EMC 整改、EMC 仿真工程师的 EMC 培训教材或参考书,还可以作为大专院校相关专业师生的教学参考书。

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

电子产品设计 EMC 风险评估/郑军奇编著. —北京:电子工业出版社,2008.5  
(电磁兼容技术系列)  
ISBN 978-7-121-06628-3

I. 电… II. 郑… III. 电子产品—电磁兼容性—设计—风险分析 IV. TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 061579 号

策划编辑:张 榕

责任编辑:宋兆武 陈心中

印 刷:北京市顺义兴华印刷厂

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

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:787×980 1/16 印张:25.75 字数:517 千字

印 次:2008 年 5 月第 1 次印刷

印 数:4000 册 定价:49.00 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。

# 前 言

本书所描述的“产品 EMC 设计与分析方法”是一种实用的方法，可以指导开发人员避免产品设计过程中所遇到的纯理论化问题。这种方法可以与电子产品的开发流程融合在一起，通过 EMC 分析的每个步骤，指出现有产品 EMC 设计的风险，并给出解决方案或改进建议，以提高产品 EMC 测试的通过率，降低产品开发成本。

本书描述的 EMC 设计分析方法也可以总结为一种方法论，即“产品 EMC 设计风险评估（分析）法”。其中 EMC 设计的风险分析过程包括如下几点：

- (1) 产品 EMC 测试计划的制定；
- (2) 产品的机械结构构架设计的 EMC 风险评估（分析），讲述如何对产品的机械结构构架设计进行 EMC 分析并评估 EMC 风险；
- (3) 单板设计的 EMC 风险评估（分析），是对复杂产品机械结构构架 EMC 风险分析的补充，其内容与产品的机械结构构架设计的 EMC 风险评估（分析）基本一致；
- (4) 电路原理图设计 EMC 风险评估（分析），讲述如何对电路原理图进行 EMC 分析；
- (5) PCB 布局布线建议，是对 PCB 布局布线提出合理的建议；
- (6) PCB 布局布线审查与 EMC 风险评估（分析），是对 PCB 布局布线建议落实情况的检查。

产品 EMC 设计风险评估（分析）法的主线是在产品中流动的共模电流，这种共模电流以标准 IEC61000—4—4 或 ISO7637—2/3 中的电快速瞬变脉冲群（EFT/B）测试原理为基础，当 EFT/B 干扰电压施加在产品的各个输入/输出信号端口上时，EFT/B 干扰电压产生的共模干扰电流将流向产品的各个部分，当这种共模干扰电流流向电路时，就会对电路产生干扰。实践证明，通过合理的产品机械结构构架设计和电路及 PCB 设计，可以使这种共模干扰电流不流向产品内部电路及其数字工作地（GND）或模拟工作地（AGND）部分，而使其流向结构地（包括产品的接地点、金属外壳、金属板等），从而避免电路受这种共模电流的干扰。当产品受结构限制无法避免共模电流流向产品内部电路时，可以通过合理的电路设计和 PCB layout 设计，使产品内部的敏感电路得到保护，这样产品也同样可以避免共模干扰电流的影响，最终降低 EMC 测试风险。大量的实践证明，通过该方法（以 EFT/B 抗扰度测试为基础的分析方法）分析而设计的产品，能在 EMC 测试中获得非常高的通过率。正确使用该方法，能使产品在第一轮或第二轮设计时就通过所有的 EMC 测试，这种通过率在产品第一轮设计时为 90%~100%，第二轮设计

时可达 100%。

本书共分 9 章。其中，第 8 章“方法论之产品 EMC 设计风险评估（分析）法”是本书的核心，描述产品设计 EMC 风险评估法的具体内容及企业如何将产品设计 EMC 风险评估法与产品的开发流程结合；该章也是对第 1~7 章所描述的产品 EMC 设计与分析方法评估（分析）法的一个应用实例。而其他章节均是该方法的一些理论基础和原理的详细解释。

第 9 章“产品的防雷击浪涌、ESD 和差模 EMC 问题设计与分析”的核心内容为：① 产品的防雷与防浪涌设计；② EMC 中的差模问题处理方法；③ 产品抗 ESD 设计。

很多企业、专家为本书的编写和出版提供了帮助。

上海易湃科电磁技术有限公司是一家专业从事 EMC 测试仪器研发、生产和销售及 EMC 技术咨询的公司。易湃科电磁技术有限公司的专家们提倡专业自主研发，自主研发的产品不但涉及 EMC 抗扰度测试仪器还涉及 EMI 测试仪器，同时他们还积极开展 EMC 技术（特别是电子产品的 EMC 设计技术）的咨询业务，为国内很多需要 EMC 技术的公司提供了专业的帮助，在解决 EMC 问题的同时，为产品及时上市创造了条件。在本书编写的过程中，易湃科电磁技术有限公司的总经理赵大勇先生提出了很多宝贵的意见。

此外，安世亚太公司的专家们也为本书提供了很多宝贵意见及素材，特别值得感谢的是徐劫勇副总裁、刘源博士、王乐硕士。作为 Simlab、FEKO 以及 ANSYS 等众多优秀仿真软件在中国区域的代理，安世亚太公司能够为电子产品系统提供从板级到系统级的完整 EMC 仿真分析解决方案，协助企业快速、高效、低成本、高质量地推出新产品。

本书的编写还得到了法国 EMC 专家 Alain. Charoy, Renzo. Piccolo, Didier. Doucet 以及英国 EMC 专家 W. Michael King 的帮助，他们对作者在本书编写过程中所遇到的技术疑难问题给予了细心的解答。赛盛技术有限公司的首席 EMC 专家吴卫兵先生、电子工业出版社的编辑张榕女士对本书的内容编排提出了宝贵的意见。在此向以上给本书提供帮助的专家们表示衷心的感谢。另外，值得庆幸的是本书所述的所有技术观点，都经过实践的检验，并有相关应用案例保存，限于本书的篇幅，作者不能将所有的应用案例写入其中，对此深感歉意。本书中所涉及的一些理论公式也许仅是近似估算式，但它将为工程师进行产品的 EMC 分析提供很大的帮助。

如果读者在阅读本书过程中对本书所述的技术观点有任何疑问，欢迎与作者联系并讨论，或索要相关应用案例。作者的 E-mail 是：Zhengjunqi.2006@163.com。

郑军奇

2007 年 12 月

# 目 录

## 前言

第 1 章 EMC 设计与测试基本概念	(1)
1.1 什么是 EMC 和 EMC 设计	(1)
1.2 产品的 EMC 性能是设计赋予的	(4)
1.3 EMC 也是常规设计准则的例外情况	(5)
1.4 EMC 测试是 EMC 设计的重要依据	(6)
1.4.1 辐射发射测试	(7)
1.4.2 传导骚扰测试	(10)
1.4.3 静电放电抗扰度测试	(13)
1.4.4 射频辐射电磁场的抗扰度测试	(17)
1.4.5 电快速瞬变脉冲群的抗扰度测试	(22)
1.4.6 浪涌的抗扰度测试	(30)
1.4.7 传导抗扰度测试	(38)
1.4.8 电压跌落、短时中断和电压渐变的抗扰度测试	(42)
1.5 EMC 理论基础	(45)
1.5.1 EMC 相关的基本单位	(45)
1.5.2 时域与频域	(46)
1.5.3 电磁骚扰单位分贝 (dB) 的概念	(48)
1.5.4 正确理解分贝的真正含义	(49)
1.5.5 电场与磁场	(51)
1.5.6 电路基本元器件及其基本特性	(52)
第 2 章 共模电流对产品 EMC 设计的重要性	(56)
2.1 产品电路中的共模和差模信号	(56)
2.2 产品 EMC 分析典型测试及其共模干扰电流	(59)
2.2.1 典型 EMC 测试 (电快速瞬变脉冲群) 波形分析	(59)
2.2.2 以共模性质施加在产品上的电快速瞬变脉冲群干扰	(62)
2.3 典型共模干扰电流的干扰分析及在产品内部传输的机理	(63)
2.4 产品的机械结构构架 EMC 分析方法	(65)
2.4.1 产品的机械结构构架决定共模电流路径	(65)

2.4.2	电快速瞬变脉冲群测试中的共模电流与产品的机械结构构架	(70)
2.4.3	实例分析	(79)
2.5	电路受共模电流干扰的机理	(82)
2.6	数字电路的噪声承受能力分析	(85)
2.7	EMI 意义上的共模电流	(93)
2.7.1	传导骚扰与共模电流	(94)
2.7.2	辐射发射与共模电流	(95)
2.7.3	产生共模电流辐射的条件	(103)
2.8	产品设计中 EMI 的共模电流与抗扰度的共模电流并不矛盾	(103)
2.8.1	接口电路良好接地泄放共模干扰电流与降低共模辐射并不矛盾	(103)
2.8.2	屏蔽电缆良好的接地对于提高抗干扰能力与降低辐射并不矛盾	(105)
2.8.3	从抗扰度角度设计的良好构架对于提高抗干扰能力与降低辐射并不矛盾	(106)
2.8.4	接口上滤波和隔离可以抑制外界干扰的共模电流也可以抑制产品内部产生的共模辐射	(107)
2.8.5	结论	(107)
2.9	相关案例分析	(108)
<b>第 3 章</b>	<b>电缆、连接器的应用及 EMC 分析方法</b>	<b>(113)</b>
3.1	EMC 测试与连接器、电缆	(113)
3.2	EMC 设计分析与电缆	(114)
3.2.1	EMI 设计分析从连接器电缆开始	(114)
3.2.2	电缆引入的的 EMC 抗扰度问题	(121)
3.2.3	关注电缆的固有电阻、电容、电感对 EMC 的影响	(122)
3.3	电缆、连接器的设计与 EMC 分析方法	(123)
3.3.1	电缆/连接器在产品中的位置决定共模电流的流向与大小	(123)
3.3.2	敏感电路、EMI 骚扰源的位置和产品中共模电流的流向	(124)
3.3.3	电缆/连接器中共模电流的抑制	(127)
3.3.4	接口电路中的滤波、抑制方法	(135)
3.4	产品内部的互连电缆设计与 EMC 分析方法	(138)
3.4.1	产品内部连接器与 EMI	(138)
3.4.2	产品内部连接器与 EMS	(143)
3.4.3	互连电缆中的串扰分析方法	(144)
<b>第 4 章</b>	<b>产品接地、隔离、浮地的 EMC 设计与分析方法</b>	<b>(146)</b>
4.1	产品接地设计与 EMC 分析方法	(146)
4.1.1	什么是接地与浮地	(146)
4.1.2	接地是改变共模电流方向的重要因素	(147)

4.2	隔离技术在 EMC 中的实质 .....	(148)
4.2.1	变压器隔离在 EMC 中的实质 .....	(149)
4.2.2	光电耦合器隔离在 EMC 中的实质 .....	(157)
4.2.3	继电器隔离在 EMC 中的实质 .....	(163)
4.2.4	使用共模扼流圈(共模电感)在 EMC 中的实质 .....	(164)
4.3	浮地产品的 EMC 设计与分析方法 .....	(167)
4.4	相关案例分析 .....	(172)
4.4.1	案例 1 .....	(172)
4.4.2	案例 2 .....	(177)
4.4.3	案例 3 .....	(179)
<b>第 5 章</b>	<b>印制线、地平面、金属板的阻抗及其 EMC 分析方法 .....</b>	<b>(184)</b>
5.1	什么是阻抗 .....	(184)
5.1.1	阻抗与特性阻抗 .....	(184)
5.1.2	阻抗的意义 .....	(185)
5.2	阻抗在实际 PCB 中的体现方式 .....	(187)
5.3	PCB 中地平面的设计与分析方法 .....	(189)
5.3.1	地平面阻抗及完整地平面的意义与设计方法 .....	(190)
5.3.2	过孔、裂缝及其对地平面阻抗的影响 .....	(194)
5.3.3	PCB 中的过孔设计技巧 .....	(202)
5.4	PCB 中印制线的 EMC 设计与阻抗分析方法 .....	(202)
5.5	导线的 EMC 设计与阻抗分析方法 .....	(205)
5.6	金属板的阻抗分析方法及在 EMC 设计中的应用 .....	(207)
5.7	连接器对阻抗的影响及 EMC 设计分析方法 .....	(208)
5.8	相关案例分析 .....	(209)
<b>第 6 章</b>	<b>滤波、去耦、旁路的设计与 EMC 分析方法 .....</b>	<b>(216)</b>
6.1	电容器的 EMC 分析 .....	(216)
6.1.1	电容器的自谐振 .....	(216)
6.1.2	电容器的并联 .....	(220)
6.1.3	X 电容和 Y 电容 .....	(222)
6.2	RC 电路 .....	(222)
6.2.1	RC 微分电路 .....	(223)
6.2.2	RC 耦合电路 .....	(224)
6.2.3	RC 积分电路 .....	(225)
6.3	再谈 LC 电路 .....	(228)



6.4	滤波器和滤波电路的设计分析 .....	(229)
6.4.1	什么是滤波器和滤波电路 .....	(229)
6.4.2	滤波效果与阻抗 .....	(231)
6.4.3	电源滤波器 .....	(232)
6.4.4	信号接口滤波器的设计方法 .....	(234)
6.5	常用信号接口电路的滤波器或滤波电路设计 .....	(238)
6.5.1	鼠标和键盘 PS/2 端口滤波设计 .....	(238)
6.5.2	RS232 接口电路的滤波设计 .....	(239)
6.5.3	RS422 和 RS485 接口的滤波设计 .....	(240)
6.5.4	E1/T1 接口电路的 EMC 设计 .....	(240)
6.5.5	以太网接口电路的 EMC 设计方法 .....	(242)
6.5.6	USB 接口电路的 EMC 设计 .....	(245)
6.6	滤波器或滤波电路的安装与放置 .....	(249)
6.7	滤波器与共模电流 .....	(253)
6.8	PCB 中的去耦设计方法 .....	(253)
6.8.1	去耦的实质 .....	(253)
6.8.2	去耦电容的选择方法 .....	(255)
6.8.3	去耦电容的安装方式与 PCB 设计 .....	(257)
6.9	电容旁路的设计方法 .....	(258)
<b>第 7 章</b>	<b>产品中的串扰防止设计与 EMC 分析方法 .....</b>	<b>(259)</b>
7.1	串扰对产品整体 EMC 性能的影响 .....	(259)
7.2	产品中的串扰是如何发生的 .....	(259)
7.3	串扰模型分析 .....	(261)
7.3.1	容性串扰 .....	(261)
7.3.2	感性串扰 .....	(269)
7.4	产品中串扰的防止方法 .....	(271)
7.4.1	哪些信号之间需要考虑串扰问题 .....	(271)
7.4.2	防止串扰的设计技术 .....	(273)
7.4.3	3W 原则的实质 .....	(274)
7.4.4	屏蔽地线(包地)对特性阻抗的影响 .....	(277)
7.5	串扰案例分析 .....	(279)
<b>第 8 章</b>	<b>方法论之产品 EMC 设计风险评估(分析)法 .....</b>	<b>(282)</b>
8.1	EMC 设计技术与管理的开发与现状 .....	(282)
8.2	产品的 EMC 测试计划制定 .....	(285)

8.2.1	测试计划的必要性	(285)
8.2.2	测试计划的内容	(285)
8.3	产品机械结构构架设计的 EMC 风险评估 (分析)	(287)
8.3.1	产品机械结构构架设计的 EMC 风险评估 (分析) 原理	(287)
8.3.2	产品相关的 EMC 重要描述	(288)
8.3.3	估算共模电流和干扰压降	(290)
8.3.4	产品的系统接地与浮地分析	(292)
8.3.5	局部接地、隔离与浮地分析	(293)
8.3.6	产品系统接地方式分析	(293)
8.3.7	工作地和大地 (保护地或机壳地) 之间的连接点的位置 (直接或通过 Y 电容接) 分析	(293)
8.3.8	金属板的应用情况、形状及其分析	(294)
8.3.9	输入/输出端口连接器在产品中或在电路板中的位置分析	(295)
8.3.10	印制电路板之间的互连、互连线和连接器处理分析	(296)
8.3.11	屏蔽需求分析	(296)
8.3.12	屏蔽体的设计方式分析	(297)
8.3.13	电缆类型及屏蔽电缆屏蔽层的连接方式分析	(297)
8.3.14	开关电源中开关管上的散热器的处理分析	(297)
8.3.15	传导骚扰与辐射发射措施的额外描述	(298)
8.3.16	产品抗 ESD 干扰措施的描述	(298)
8.3.17	其他 EMC 方面的考虑	(299)
8.4	单板设计的 EMC 风险评估 (分析)	(299)
8.5	电路原理图设计的 EMC 风险评估 (分析)	(299)
8.5.1	电路原理图设计的 EMC 风险评估 (分析) 原理	(299)
8.5.2	电路原理图描述	(301)
8.5.3	电路原理图进行 EMC 描述	(301)
8.5.4	电路原理图的滤波分析	(303)
8.5.5	地及地平面分析	(304)
8.5.6	高速线的 EMC 分析及处理	(306)
8.5.7	敏感信号线的 EMC 分析及处理	(306)
8.5.8	指出并确认未使用元器件及悬空信号线并对其进行 EMC 处理	(307)
8.6	PCB 布局布线的建议	(307)
8.6.1	PCB 布局布线的建议的意义	(307)
8.6.2	PCB 层数及各层的分配建议	(308)

8.6.3	GND、AGND等地平面及VCC等电源平面在PCB层中的位置	(310)
8.6.4	指出敏感元器件在PCB中放置的相对位置	(311)
8.6.5	滤波电容等滤波器件在PCB中的相对放置	(311)
8.6.6	GND地平面的设计	(312)
8.6.7	模拟地AGND地平面的设计	(312)
8.6.8	VCC电源平面的设计	(312)
8.6.9	串扰防止的处理方式	(312)
8.6.10	特殊信号线(如时钟信号线、高速信号线、敏感信号线等)的处理方式	(313)
8.6.11	PCB中空置区域的处理	(313)
8.6.12	其他建议	(313)
8.6.13	PCB布局布线示意图	(313)
8.7	PCB设计审查与EMC风险评估(分析)	(315)
8.7.1	PCB设计审查的意义和任务	(315)
8.7.2	地平面完整性及其阻抗审查	(315)
8.7.3	串扰审查	(316)
8.7.4	去耦一旁路电容和滤波电容的审查	(316)
8.7.5	PCB布局布线文件	(317)
8.8	如何将产品EMC设计风险评估(分析)法融入到企业产品开发流程中	(319)
8.8.1	EMC与产品研发成本	(319)
8.8.2	产品EMC设计风险评估(分析)法融入产品开发流程	(319)
8.9	产品EMC分析之辅助仿真工具	(321)
8.9.1	辅助仿真工具Simlab之PCBMod	(322)
8.9.2	辅助仿真工具Simlab之CableMod	(326)
8.9.3	PCBMod和CableMod联合实现完整产品的EMC仿真	(329)
8.10	产品EMC设计风险评估(分析)法Simlab仿真实例	(331)
8.11	产品EMC设计风险评估(分析)法之应用实例	(338)
8.11.1	概述	(338)
8.11.2	产品机械结构构架设计的EMC风险评估(分析)实例	(338)
8.11.3	单板设计的EMC风险评估(分析)实例	(344)
8.11.4	电路原理图设计的EMC风险评估(分析)实例	(344)
8.11.5	PCB设计审查与EMC风险评估(分析)实例	(352)
8.11.6	PCB设计审查实例	(355)
<b>第9章</b>	<b>产品的防雷击浪涌、ESD和差模EMC问题设计与分析</b>	<b>(362)</b>
9.1	产品的防雷与防浪涌	(362)

9.1.1	雷击与浪涌 .....	(362)
9.1.2	常用测试波形的允许容差 .....	(364)
9.1.3	防雷电路中的元器件 .....	(365)
9.1.4	交流电源口防雷电路和防浪涌电路的设计 .....	(377)
9.1.5	直流电源口防雷电路和防浪涌电路的设计 .....	(379)
9.1.6	信号口防雷和浪涌保护电路设计 .....	(381)
9.1.7	电源防雷器的安装 .....	(383)
9.1.8	信号防雷器的接地 .....	(385)
9.2	EMC 中的差模干扰与骚扰 .....	(386)
9.2.1	什么是差模 .....	(386)
9.2.2	接口电路中的差模干扰与骚扰 .....	(386)
9.2.3	PCB 电路中的差模干扰与骚扰 .....	(387)
9.2.4	解决电路中的差模干扰与骚扰的方法 .....	(392)
9.3	产品防 ESD 设计与分析方法 .....	(392)
9.3.1	ESD 干扰产生的机理 .....	(392)
9.3.2	绝缘外壳设备的防 ESD 设计方法 .....	(393)
9.3.3	金属外壳设备的防 ESD 设计方法 .....	(394)
9.3.4	通过良好的搭接与接地防止 ESD .....	(394)
9.3.5	通过 PCB 布局布线防止 ESD 产生的电磁场感应 .....	(395)
9.3.6	I/O 端口的 ESD 防护 .....	(396)
	<b>参考文献</b> .....	(398)

# 第 1 章

## EMC 设计与测试基本概念

### 1.1 什么是 EMC 和 EMC 设计

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, 也是电子、电气设备或系统的一项重要重要的技术性能。就世界范围来说, 电磁兼容性问题已经形成一门新的学科, 也是一门以电磁场理论为基础, 包括信息、电工、电子、通信、材料、结构等学科的边缘科学, 同时也是一门实践性比较强的学科, 需要产品工程师具有丰富的实践知识。电磁兼容的中心课题是研究如何控制和消除电磁干扰, 使电子设备或系统与其他设备联系在一起工作时, 不导致设备或系统的任何部分的工作性能的恶化或降低。一个设计理想的电子设备或系统应该既不发射任何不希望的能量, 又应该不受任何不希望有的能量的影响。当然, 在电子设备或系统出厂前, 衡量其 EMC 性能好坏的主要依据就是 EMC 测试结果。这些测试, 就是模拟产品在实际工作环境中发生的一些骚扰和干扰, 如图 1-1 所示。目前, 衡量一个产品的 EMC 性能主要从以下两个方面来考虑。

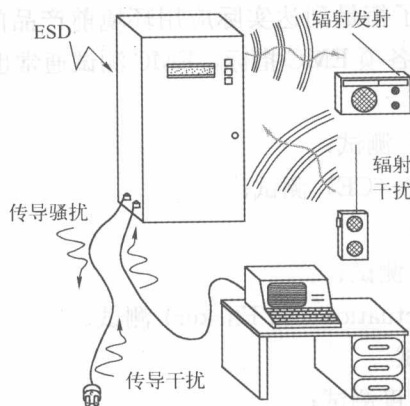


图 1-1 产品在实际工作环境中发生的一些骚扰和干扰

(1) EMI (Electro Magnetic Interference) ——电磁干扰性能。即处在一定环境中的设备或系统正常运行时,不应产生超过相应标准所要求的电磁能量干扰。这样的电磁干扰有:

- 从电源线传导出来的电磁骚扰;
- 从信号线、控制线传导出来的骚扰;
- 从产品壳体(包括产品中的所有电缆)辐射出来的骚扰;
- 从电源端口传导出来的谐波电流(Harmonic);
- 电源端口产生的电压波动和闪烁(Fluctuation and Flicker)。

(2) EMS (Electro Magnetic Susceptibility) ——电磁抗扰度性能。即处在一定环境中的设备或系统正常运行时,设备或系统能承受各种类型的电磁能量干扰。这种电磁能量干扰主要有:

- 静电放电;
- 电源端口的电快速瞬变脉冲群;
- 信号线、控制线端口的电快速瞬变脉冲群;
- 电源端口的浪涌和雷击;
- 信号线、控制线端口的浪涌和雷击;
- 从空间传递给产品壳体的电磁辐射;
- 电源端口传入的传导干扰;
- 电源端口的电压跌落与中断。

EMC 设计则是在产品设计过程中,利用一定的设计技巧和额外的技术手段提高产品的 EMC 性能(包括产品的抗干扰能力和产品的抗骚扰水平),并能在一定环境中按照产品的设计期望正常运行。为了衡量到达实际应用环境前产品的 EMC 性能,则需要进行 EMC 测试。对应于以上产品各项 EMC 指标,EMC 测试通常也有如下两个方面。

#### (1) EMI 电磁干扰测试

- 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)测试;
- 电压波动和闪烁(Fluctuation and Flicker)测试。

#### (2) EMS 电磁抗扰度测试

- 静电放电(ESD)抗扰度测试;
- 电源端口的电快速瞬变脉冲群(EFT/B)抗扰度测试;
- 信号线、控制线的电快速瞬变脉冲群(EFT/B)抗扰度测试;

- 电源端口的浪涌 (SURGE) 和雷击测试;
- 信号线、控制线的浪涌 (SURGE) 和雷击测试;
- 壳体辐射抗扰度 (RS) 测试;
- 电源端口的传导抗扰度 (CS) 测试;
- 信号线、控制线的传导抗扰度 (CS) 测试;
- 电源端口的电压跌落与中断测试 (DIP)。

对于汽车及车载电子设备,由于其电磁环境与供电环境相对特殊,其 EMC 测试也相对特殊,但也可分为 EMI 测试和 EMS 测试两大类。它更加突出 ISO、CISPR 和 SAEJ 标准的重要性,具体的 EMC 测试项目有两个。

#### (1) EMI 测试

● 符合 CISPR25 (对应国标为 GB18655)、CISPR12 (对应国标为 GB14023)、SAEJ551/5 (对应国标为 GB18387) 标准的辐射骚扰测试;

- 符合 CISPR25 (对应国标为 GB18655) 标准的传导耦合/瞬态发射骚扰测试。

#### (2) EMS 测试

- 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。

EMC 设计不能像硬件电路设计、结构设计、软件设计等设计活动可以单独存在,它依附于产品的其他设计活动中。如果一定要对 EMC 设计活动进行分类,那么主要包括:

- (1) 产品的 EMC 标准和需求分析;
- (2) 产品机械结构构架的 EMC 设计,包括产品中的电缆部分的设计;
- (3) 电路原理图的 EMC 设计;
- (4) PCB 的 EMC 设计;
- (5) EMC 测试过程中出现问题的改进。

## 1.2 产品的 EMC 性能是设计赋予的

一般电子产品设计时不考虑 EMC 问题,就会导致 EMC 测试失败,以致不能通过相关法规的认证,而不能出厂销售。即使这种产品应用到实际工作环境中,也会出现一些实际问题。因此,在实际应用中,需要不断地研究出实用的方法来消除电磁干扰和骚扰。例如,工程师们根据需求设计出了效果良好的滤波电路,置于产品 I/O 接口的前级,可使大多数因传导而进入系统的干扰噪声消除在电路系统的入口处;设计出了隔离电路(如变压器隔离和光电隔离等)解决通过电源线、信号线和地线进入电路的传导干扰,同时阻止因公共阻抗、长线传输而引起的干扰;设计出了能量吸收回路,从而减少电路、器件吸收的噪声能量;或通过选择元器件和合理安排电路系统,使干扰的影响减小。

在电子产品的设计中,为获得良好的 EMC 性能和成本比,对产品进行 EMC 设计是重要的;电子产品的 EMC 性能是设计赋予的。测试仅仅是将电子产品固有的 EMC 性能用某种定量的方法表征出来。对于 EMC 设计来讲:

首先,应在研发前期考虑 EMC 设计。如果产品设计前期不考虑 EMC 问题,仅寄希望于测试阶段解决(表现为通过整改来解决设计成型产品的 EMC 问题,这样大量的人力和物力都投入在后期的测试/验证、整改阶段)。那么,即使产品整改成功,大多情况下还是会由于整改涉及电路原理、PCB 设计、结构模具的变更,导致研发费用大大增加,周期大大延长。只有在前期产品设计过程中考虑与预测 EMC 问题,把 EMC 变成一种可控的设计技术,并行和同步于产品功能设计的过程,才能一次性地把产品设计好。

其次,通过设计提高电子产品的 EMC 性能,绝对不是企业内 EMC 专家一个人所赋予的,因为 EMC 绝对不可能脱离产品硬件、结构等实物而存在。因此,要使设计的电子产品一次取得良好的 EMC 性能,就需要提高产品设计工程师的 EMC 经验与意识问题。如硬件工程师,除了原先必须掌握的电路设计知识外,还应该掌握 EMI 和 EMS 抗干扰设计的基本知识;PCB 设计工程师需要掌握相应的器件布局、层叠设计、高速布线方面的 EMC 设计知识;结构工程师也需要了解产品结构的屏蔽等方面的设计知识。因为这些共同参与产品设计的工程师,要去实现 EMC 专家在产品过程中所提出的意见,就要理解、领会 EMC 专家所提出的建议的奥秘,并与各自领域的设计特点相结合,将所有 EMC 问题的萌芽消灭在产品阶段。只有所有参与产品设计的开发人员共同提高 EMC 素质,才能设计出具有高性能 EMC 的电子产品。

再次,企业要自己建立一套规范的 EMC 设计体系和设计分析方法,即在研发流程中融入 EMC 设计分析及风险评估的过程,在产品设计的各个阶段进行 EMC 的评估和分析控制,把可能出现的 EMC 问题在研发前期进行考虑,并预测 EMC 测试的失败风险。针对可能出现的 EMC 问题进行前期充分考虑,并找到解决方案,从而确保产品设计结束后能够一



次性通过测试与认证。当然，这对于企业来讲，也将减少不必要的人力及研发成本，缩短产品上市周期。本书所描述的 EMC 设计体系和设计分析方法是一种很好的参考方法。

### 1.3 EMC 也是常规设计准则的例外情况

产品的电路原理是用电路图来描述的，但是电路图是仅着眼于按原定目的传输信号而把电路抽象化的模型。从 EMC 的观点来看，可以说电路图几乎什么也没描述。因此，需要考虑抽象化过程中所舍弃的现象和耦合在实际电路中的意义和影响。例如，各元件的寄生参数（包括寄生电感和寄生电容），元件间的布线阻抗，元件间或电路间的耦合，几何位置不当引起的电磁耦合，电路元件和配线不当产生的耦合（公共阻抗耦合及电容器在高频呈感抗），电路与外部干扰的耦合。

EMC 问题总是起始于电路级，最终也结束于电路级。但 EMC 问题与电路设计不一样，它必须有“干扰源—耦合路径—敏感器”三要素同时存在，才会出现 EMC 问题。缺少三要素中的任何一个，EMC 问题就不会存在。EMC 设计就是针对三要素中的一个或几个，采取某些技术措施，限制或消除其影响，从而得到 EMC 性能好、成本可接受的产品。其中，耦合路径是 EMC 问题研究中的重点和难点。通常耦合路径分为可见和不可见的，可见部分为产品电路中实际存在的电路形成的路径，不可见的通常为由于寄生参数而形成的额外通道。可见的耦合路径通常就是差模耦合路径，如 PCB 中高速信号环路引起的对外辐射（图 1-2）、PCB 中信号环路感应到外界的辐射电磁场干扰（图 1-3）。

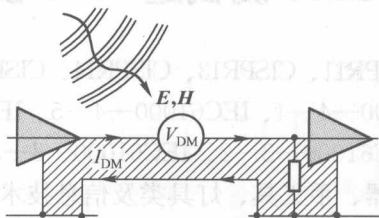
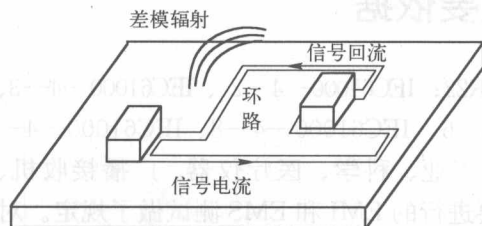


图 1-2 PCB 中高速信号环路引起的对外辐射 图 1-3 PCB 中信号环路感应到外界的辐射电磁场干扰

不可见的耦合路径通常就是共模耦合路径，如 PCB 中高频信号源与大地之间寄生电容形成共模电压而产生的共模辐射（图 1-4）。

又如图 1-5 所示，由于寄生电容使共模电流有注入的通道，当共模干扰电压注入到产品电缆时，由于电缆、产品本身与参考接地板之间寄生电容形成的共模回路而产生共模电流，使产品内部电路受共模电流的影响。