

ANSYS原厂策划 万水精心出品

ANSYS核心产品系列

ANSYS®



万水ANSYS技术丛书

# 电磁兼容原理分析 与设计技术

林汉年 编著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

万水 ANSYS 技术丛书

# 电磁兼容原理分析与设计技术

林汉年 编著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

## 内 容 提 要

电磁兼容性要求是各国为确保电机电子产品能于其所规划应用的环境中正常操作而制定的,因此是强制要求检验的项目,也因此成为产品设计与系统整合工程师必备的工程技术能力。本书基于作者多年产品研发、标准审订、测试实验室认证评鉴、学术研究的经验进行EMC实务分析与根本原因及原理说明,同时纳入电源完整性与信号完整性等重要议题,并提供仿真软件的分析案例,有别于一般EMC参考书籍只着重于EMC现象与问题的解决,可谓兼顾理论与实务、模拟与量测技术并重;同时为配合高科技产业的发展,本书还将IC芯片与无线通信的EMC效应与设计方案纳入,因此适合从事半导体、IC设计、电机电子产品、信息通信产品、车用电子产品等开发与制造的工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容原理分析与设计技术 / 林汉年编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2016.8  
(万水ANSYS技术丛书)  
ISBN 978-7-5170-4464-2

I. ①电… II. ①林… III. ①电磁兼容性—有限元分析—应用软件 IV. ①TN03-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第142180号

策划编辑: 杨元泓

责任编辑: 张玉玲

封面设计: 李 佳

书 名	万水 ANSYS 技术丛书 电磁兼容原理分析与设计技术
作 者	林汉年 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: <a href="http://www.waterpub.com.cn">www.waterpub.com.cn</a> E-mail: <a href="mailto:mchannel@263.net">mchannel@263.net</a> (万水) <a href="mailto:sales@waterpub.com.cn">sales@waterpub.com.cn</a>
经 售	电话: (010) 68367658 (发行部)、82562819 (万水) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	三河市铭浩彩色印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 30.5印张 758千字
版 次	2016年8月第1版 2016年8月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	79.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换  
版权所有·侵权必究

## 序

我国正处于从中国制造到中国创造的转型期，经济环境充满挑战。由于80%的成本在产品研发阶段确定，如何在产品研发阶段提高产品附加值成为制造企业关注的焦点。

在当今世界，不借助数字建模来优化和测试产品，新产品的的设计将无从着手。因此越来越多的企业认识到工程仿真的重要性，并在不断加强应用水平。工程仿真已在航空、汽车、能源、电子、医疗保健、建筑和消费品等行业得到广泛应用。大量研究及工程案例证实，使用工程仿真技术已经成为不可阻挡的趋势。

工程仿真是一件复杂的工作，工程师不但要有工程实践经验，同时要对多种不同的工业软件了解掌握。与发达国家相比，我国仿真应用成熟度还有较大差距。仿真人才缺乏是制约行业发展的重要原因，这也意味着有技能、有经验的仿真工程师在未来将具有广阔的职业前景。

ANSYS 作为世界领先的工程仿真软件供应商，为全球各行业提供能完全集成多物理场仿真软件工具的通用平台。对有意从事仿真行业的读者来说，选择业内领先、应用广泛、前景广阔、覆盖面广的 ANSYS 产品作为仿真工具，无疑将成为您职业发展的重要助力。

为满足读者的仿真学习需求，ANSYS 与中国水利水电出版社合作，联合国内多个领域仿真行业实战专家，出版了本系列丛书，包括 ANSYS 核心产品系列、ANSYS 工程行业应用系列和 ANSYS 高级仿真技术系列，读者可以根据自己的需求选择阅读。

作为工程仿真软件行业的领导者，我们坚信，培养用户走向成功，是仿真驱动产品设计、设计创新驱动行业进步的关键。



ANSYS 大中华区总经理

2015 年 4 月

# 前 言

电磁兼容性要求是各国为确保电机电子产品能于其所规划应用的环境中正常操作而制定的，是强制要求检验的项目，也因此成为产品设计与系统整合工程师必备的工程技术能力。

要了解电机电子产品与系统的电磁兼容性问题与相关测试标准法规，我们先要从分析形成电磁干扰现象的基本要素出发，而这些要素和相关的干扰能量传输机制是相关测试法规与测试方法的基础。由电磁干扰源发射的电磁能量经过耦合路径传输到对电磁噪声敏感的设备，这个过程称为电磁干扰效应。为了实现电磁兼容性的设计与各类电气产品对应的验证测试，我们必须从基本要素出发，从技术和组织两个方面着手。所谓技术，就是从分析电磁干扰源、耦合路径和敏感设备着手，采取有效的技术，抑制干扰源、消除或减弱干扰的耦合、降低敏感设备对干扰的回应；对人为干扰进行限制并验证所采用技术的有效性。组织，则是制订和遵循一套完整的标准和规范，进行合理的频谱分配，控制与管理频谱的使用，依据频率、工作时间、天线方向性等规定工作方式，分析电磁环境并选择地域，进行电磁兼容性管理等。

电磁兼容性是电子设备或系统的主要性能之一，电磁兼容设计是实现设备或系统规定的功能、使系统效能得以充分发挥的重要保证，因此必须在设备或系统功能设计的同时进行电磁兼容设计。电磁兼容设计的目的是使所设计的电子设备或系统在预期的电磁环境中实现电磁兼容，其要求是使电子设备或系统满足 EMC 标准的规定并具有以下两方面的能力：

- 能在预期的电磁环境中正常工作，而且无效能降低或故障。
- 对于该电磁环境不是一个污染源。

第 1 章会介绍什么是 EMC、EMC 的目的是什么、为什么现在越来越多。

第 2 章系统分析。要先知道噪声源特性，EMC 是三者互容，互容代表有很多东西存在于这里面，彼此之间是可以兼容的，所以一定会有噪声源，这些噪声源我们怎么来做分析？有哪些噪声源？这些噪声源频谱特性是怎样的？要知道噪声源的特性才有办法做实际的设计分析，以及有了噪声源之后，这个噪声源是通过怎样的耦合机制，因为 EMC 是一个 broadband，当它是一个宽带的时候，会发现在低频的时候是以电压电流的方式传送，可以通过传输线的方程式的概念来看；当频率说高不高说低不低的时候，就用传输线的概念来看，这时候就是近场耦合；当频率更高，波长跟开口的结构尺寸或传输线、散热片结构尺寸相近的时候就会产生共振，而共振就会产生辐射，所以知道有哪些是噪声源和噪声源的频谱特性之后，这些噪声源会通过怎样的耦合机制把能量带出去、干扰到什么东西才是 EMC，所以要做 EMC 的设计也从这里开始，擒贼先擒王，一开始如果能够把噪声源控制住，那么问题就解决了，如果控制不住，就把它的耦合路径断掉，比如说传导的时候就做滤波、高频辐射的时候就做屏蔽，频率说高不高说低不低的串音就用 PCB 的 Layout 来改变。

第 3 章分析是通过怎样的方式才会将噪声进行耦合传送，以致形成电磁干扰的问题。

第 4 章主要介绍在电子科技发展过程中，组件的非理想特性所造成的 EMC 根源的接地弹跳或电源不稳定，进而演变为电源完整性问题。而在目前科技产业要求提升通信效能与数据传输速度的同时，高速数字电路信号完整性 (SI) 问题 (第 5 章) 以及最后产生的电磁干扰 (EMI)

效应与问题（第 6 章）是没有办法避免的，因此各技术组织与各国政府才需要制订相关的产品 EMC 标准，规范产品的 EMC 测试与管制限制，这些均在第 7 章中讲述。既然电磁噪声在产品运行过程中无法避免，在这种情况下会造成怎样的失效而无法符合标准要求，以及如何诊断解决，就成为第 8 章失效原因分析的内容，有这么多的复杂内容，那么知道什么才可以有对策，最后就谈到累积排错经验后的 EMC 设计技巧（第 9 章），如屏蔽、PCB 的布局与走线、滤波技术等，以协助工程师或产品开发规划者能从一开始就解决 EMC 的问题，而不是等到上市前的认证测试发现问题后才开始亡羊补牢，贻误商机。

本书虽是从实务角度出发，但为了提供完整且严谨的理论依据，书后补充有关电磁基础理论（附录 A）和屏蔽技术原理（附录 B），以方便读者更了解电磁兼容技术的相关理论，进而发展出属于自己的研究与创新领域。

作者

2016 年 7 月

# 目 录

序	
前言	
第 1 章 电磁兼容简介与目的	1
1-1 电磁兼容的现象	2
1-2 电磁兼容的发展趋势	7
1-3 电磁兼容面临的技术挑战	9
第 2 章 电气系统的电磁兼容噪声源分析	18
2-1 瞬时噪声	18
2-2 切换/开关噪声	22
2-3 数字频率/时钟信号与符码信号	28
2-4 ANSYS 仿真范例 1: 数字脉冲信号上升/下降时间对电磁干扰 EMI 的频谱效应	39
第 3 章 电磁耦合原理分析	48
3-1 传导耦合	51
3-2 近场串扰耦合	54
3-2-1 电容性的噪声干扰	57
3-2-2 电感性的噪声干扰	60
3-2-3 电容性噪声耦合和电感性噪声耦合的总效应	60
3-2-4 电感与电容矩阵表达式	62
3-2-5 两条对称传输线的奇模态和偶模态与电感和电容矩阵的关系	65
3-3 辐射耦合	68
3-4 共振耦合	71
3-5 槽孔耦合	73
第 4 章 电源完整性效应分析	75
4-1 电源供应网络的功能与问题	76
4-2 电源供应的架构分析	84
4-3 电源阻抗分析	88
4-4 PCB 共振效应与电源阻抗分析	93
4-5 去耦合电容对电源完整性的影响	101
4-6 电源完整性问题的效应	109
第 5 章 信号完整性效应分析	114
5-1 影响信号完整性的因素	117
5-2 差模信号的模态转换噪声分析	138
5-3 高速串接链路分析	157
5-4 高速连接器信号完整性设计分析	178

5-5	ANSYS 仿真范例 2: 传输线的阻抗时域反射与串扰分析	190
5-6	ANSYS 仿真范例 3: 电路阻抗对近场串扰的效应	198
<b>第 6 章</b>	<b>电磁干扰效应分析</b>	<b>206</b>
6-1	电路布线的电磁干扰效应	207
6-2	传输线屏蔽结构的电磁干扰效应	226
6-3	机构槽孔的电磁干扰效应	233
6-4	无线通信载台噪声分析	237
6-4-1	移动通信装置内高速数字传输线对天线的噪声耦合分析	237
6-4-2	LCD 控制电路模块干扰噪声对 802.11 无线局域网的传输影响分析	242
6-5	瞬时噪声耐受问题分析	249
6-5-1	ESD 放电模型	249
6-5-2	IEC 62215-3 的 EFT 测试配置与失效准则	251
6-6	ANSYS 仿真范例 4: PCB 接地平面开槽的耦合与 EMI 效应分析	260
6-7	ANSYS 仿真范例 5: PCB 接地平面开槽的信号完整性 SI、电源完整性 PI 与 EMI 效应分析	267
<b>第 7 章</b>	<b>电磁兼容法规要求与量测原理</b>	<b>281</b>
7-1	EMC 符合性法规简介	283
7-2	产品层级传导干扰测试	286
7-3	产品层级辐射干扰测试	287
7-4	产品层级电磁耐受性测试	288
7-5	车用电子 EMC 测试技术发展	291
7-5-1	车用电子应用发展趋势和相应的 EMC 要求	293
7-5-2	高度整合化汽车电子遭遇系统性问题分析	293
7-5-3	车辆零部件 EMC 相关标准与规范的发展	294
7-5-4	车辆零部件 EMC 测试方法简介	295
7-5-5	车辆零部件 EMC 测试原理简介	296
7-5-6	Telematics 车载电子通信系统的 EMC 问题趋势与测试分析	303
7-6	集成电路 (IC) 层级 EMC 测试技术	305
7-6-1	集成电路电磁兼容的标准化	306
7-6-2	IC-EMI 量测方法简介	307
7-6-3	车用电子及集成电路的 EMC 限制值简介	310
7-6-4	异步瞬时注入法介绍	312
<b>第 8 章</b>	<b>电磁兼容失效分析</b>	<b>319</b>
8-1	电磁兼容问题诊断技巧	320
8-2	EMC 问题诊断流程	328
8-3	EMC 失效原因与分析	331
8-4	射频干扰分析与对策	349
<b>第 9 章</b>	<b>系统产品电磁兼容设计策略</b>	<b>357</b>
9-1	组件的选择	360
9-2	组件的布局	364



9-3	印刷电路板走线与设计	365
9-3-1	PCB 设计技术对 EMC 效应改善分析	373
9-3-2	PCB 设计对静电放电 (ESD) 回路的效应	376
9-4	产品内部缆线与模块的规划	379
9-5	滤波与瞬时抑制技术分析	384
9-5-1	滤波技术	384
9-5-2	瞬时噪声抑制技术	397
9-6	屏蔽技术分析 with 机壳构装	418
9-7	产品外部连接器与缆线规划	426
9-8	噪声预算表应用	434
9-9	ANSYS 仿真范例 6: 去耦合电容摆放位置对降低 EMI 效应的分析	439
9-10	ANSYS 仿真范例 7: 电磁屏蔽材料的屏蔽效能分析	448
附录 A	基础电磁原理	453
A-1	麦克斯韦方程组	453
A-2	麦克斯韦方程组所对应的物理定律	457
A-3	边界条件	461
A-4	均匀平面波	462
A-5	功率流与交流电阻	466
附录 B	电磁屏蔽原理分析	470
B-1	电磁屏蔽原理	470
B-2	电磁屏蔽效能定义	471
B-3	电磁屏蔽材料	472
B-4	近场电磁屏蔽	472
B-5	低频磁场屏蔽	473
B-6	不连续性屏蔽的处置	473
B-7	多层平板屏蔽体	474

# 1

## 电磁兼容简介与目的

什么叫电磁兼容性 (Electromagnetic Compatibility, EMC)? 这可由两个方面来说明 (如图 1-1 所示): 一方面是电磁干扰, 即任何数字组件本身在做逻辑状态切换的时候会对周围产生电磁场影响, 而这样的电磁场影响就是所谓的噪声源 (Source), 所以必须考虑到任何不同产品的类别, 不同产品类别会因为设计的技术和使用的工程技术与组件特性不同致使产生的频率和强度不同; 另一方面是电磁耐受或免疫力 (抗扰力), 电磁耐受就是有些系统、产品或零件无法抵挡外部环境的电磁噪声以及很多必要的无线通信与广播能量, 因为对某些使用者而言, 那些是有用的信号, 但对未使用到或不需要该无线信号的人而言, 就会形成干扰噪声。

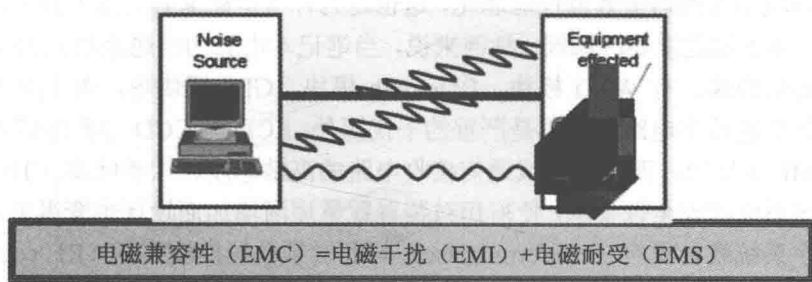


图 1-1 电磁兼容的含义

所以 EMC 的含义就是: 了解自己所设计的东西一定会产生噪声, 这个噪声用在什么场合和什么情境之下会干扰其他的组件、产品、设备, 以至于令其产生误动作; 清楚这样的设备或使用者, 也同样会处在不同的电磁环境之下, 因此要了解这个地方所产生的电磁场 (包括自然界的雷击、静电等) 或者它的供应电压电流可能并不稳定会不会对系统或电路造成操作上的影响, 就要进行电磁耐受性防护。

由于任何系统在进行信号沟通的时候, 不管是通过有线还是无线方式都一定需要耦合或传输路径, 因此国际电通协会谈到, 设备应能够在它欲使用的环境下正常运行, 该设备欲使用的可能是工业环境、汽车环境、航天环境、医疗环境等, 而在这些环境下本来就存在一些电磁

场, 这样的电磁场会不会对设备性能造成影响就是电磁耐受性 (EMS), 因此对各种使用环境下的产品都有 EMC 规格要求, 而且各个不同地区所要求的规格等级会有不同, 例如由于美国中西部气候干燥, 因此对静电的要求等级就很严格, 而北欧国家对太阳黑子和极光的电磁噪声要求很严格, 部分大陆地区则会因为产业发展迅速, 因此针对电源稳定性要求就很严格。

此外, 系统在环境里运行会不会造成周围其他对象的误动作, 这就是电磁干扰的问题, 而只要有电压电流的变化, 便一定会产生电场与磁场, 所以电磁兼容性 (EMC) 不是要抑制所有的电磁噪声, 而是要通过设计规划达到电子电路运作的可兼容并蓄、不会彼此严重影响的目的。所以 EMC 技术涵盖的范围很大, 其对象可以是一辆车、一个组件、一个模块、一块 IC, 甚至可以只是 IC 内部的一个功能区块, 终极的 EMC 目标就是希望 IC 内部的功能区块能和平相处而不会产生误动作, 使该 IC 达到要求的功能规格, 那也就会衍生出系统内部干扰的问题, 称为 Self EMC 或 Intra-EMC, 系统内部干扰讨论的也是载台噪声 (Platform Noise), 例如当无线通信装置内部的数字组件启动之后, 该组件产生的电磁噪声的水平是否太高, 以至当接收外部的通信信号时, 因为信噪比 (S/N ratio) 变差, 以致严重影响通信效果; 另外还有系统间 (Inter System) 干扰问题, 其目的即在保护消费者能在室内环境中正常地使用设备, 目前的 EMC 标准即是针对此类产品, 也就是确保系统与系统之间能正常运作, 如投影机、计算机、灯具等在使用时会不会对其他的投影机、计算机、灯具造成干扰影响, 而 Intra-System 问题就是研究在无线通信装置或是汽车内部, 因有非常多不同的模块与组件并存, 彼此之间会不会有效能影响, 所以我们讨论 EMC 就必须从一个系统整合的角度来看, 小到一块功能 IC 的功能区块大到一架飞机都是如此, 因此 EMC 范畴就是当使用各式电机电子产品时, 由于势必会产生不同层次的电磁扰动, 以及不管是人为造成还是自然造成 (雷击、闪电、静电) 的环境, 为防止产品彼此间有所干扰, 所以就有很多相关的测试标准与规范应运而生。

一般来说, 电磁兼容是定义一个电子系统或组件能工作在恰当的电磁环境中, 而不是在不正常的干扰环境中而遭遇失效或性能恶化, 这也是为什么电磁兼容对于产业 (尤其是电子科技与无线通信产业) 如此重要的原因。举例来说, 当笔记本电脑功能越来越强的同时也在内部加入许多无线通信模块, 有 Wi-Fi 模块、Bluetooth 模块、GPS 模块等, 由于除了高速的中央处理器与内存等高速数字电路组件都是严重的干扰源外, LCD 与 CCD 等影像信号传输线路也都是明显的 EMI 干扰源; 而随着无线通信接收电路的高敏感度、大吞吐率 (Throughput) 以及智能汽车电子系统的安全性要求, 使得相对装置数量逐渐增加而设计也变得更为复杂, 如果没有考虑到数字系统载台噪声 (Platform noise) 与各射频系统模块共存 (RF coexist) 问题, 那么在系统整合完成后所面临的电磁兼容性问题将会使整个产品开发进度受到极大的考验与延误。因此, 为达到无线通信系统较高传输速率或较远传输距离 (大覆盖率) 与较低噪声水平的要求, 以及强化智能汽车电子系统的安全性, 利用系统整合概念, 通过问题的原因分析及 EMC 设计改善方法, 以降低制造成本、改善通信质量及强化电子产品效能等就成为本书的主要目的。

## 1-1 电磁兼容的现象

现代生活中, 除了自然界的电磁干扰现象外, 电子科技的普及化带来了各种人为的电气噪声, 也导致更复杂的电磁环境。

随着第三代 3G 移动通信的普及与第四代 4G 移动通信的发展及基站的布建,使用智能手机、平板电脑上网已经成为人们的生活习惯,同时科技产业积极推广的智慧生活更使得未来连汽车、电视、冰箱也都可以直接上网,随时随地交换环境信息并彻底改变生活形态。此外,随着智能运输系统与车联网的发展趋势,无线技术的应用更使环境电磁波的效应与环保问题更加严重。

伴随着移动通信的使用需求越来越大,数据传送接收速度的要求越来越快,无线通信接收电路对高灵敏度的要求也益趋严苛,因此除了各国电信主管部门持续对无线通信装置进行传统的辐射功率(如 ERP、EIRP 等)与频宽等要求,以避免造成通信系统间彼此干扰外,相关的组织(如 CTIA、PTCRB 等)与厂商也开始对无线通信装置的天线机构与电磁兼容性效应进行性能上的规范(如 TRP、TIS、Throughput)以提升通信系统的效能。然而对于所有电子电气设备或装置而言,当设备间相互联通或置于邻近的位置时,所有的电子电气设备或装置都会因电磁效应而相互影响,如洗衣机或架空的电力线路可能因运作时产生的电磁波而影响附近的电视机或收音机的接收质量,如图 1-2 所示。一般家庭里处处充斥着会产生电磁噪声的电子产品,其中有小至电动牙刷大至日常生活所使用的智能手机、平板电脑、笔记本电脑、电动工具、LED 灯的控制器和一些未经测试认可的有问题的电子设备。此外,值此无线通信系统已发展成熟,而且嵌入数字应用电路在各种电子产品的时刻,未来生活环境中将有更多高速传输的无线通信产品相互连接,在寻求生活的便利性时却可能因为其他电子产品所发射的电磁波噪声造成信号错误,进而导致产品的功能无法正常使用。因此,当多个无线装置同时运作而导致产品无法顺利接收正确信号或是无线装置在互联之间所传送的信号与对应装置所能接收的是不同频率,在为了使两者能互相连接而需要转换频率所造成的噪声导致传输信号失真时,将使得原本的应用装置功能失效,为了促进产业发展及保护消费者,世界各国政府、技术组织与产业联盟纷纷建立相关的电磁兼容性规范,以建立电子与无线通信科技产业的符合性认证体系。

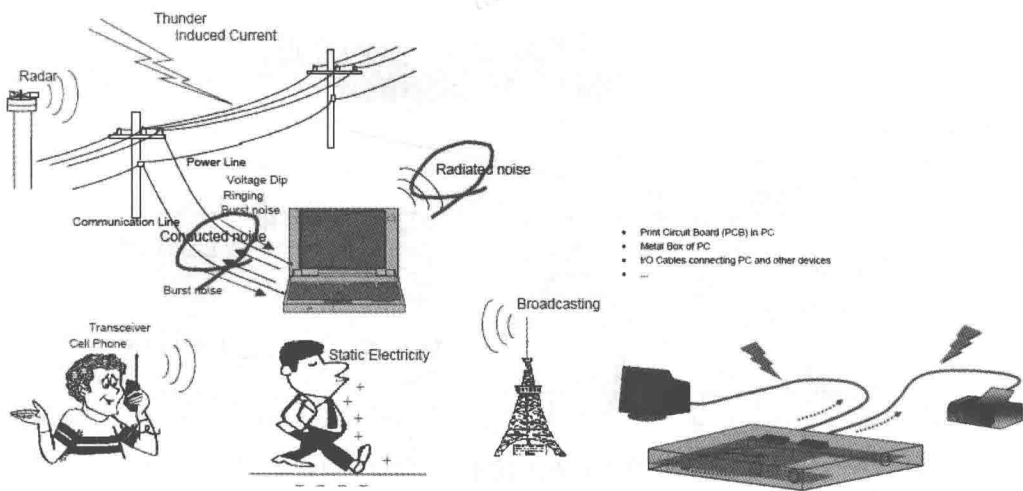


图 1-2 生活与计算机周遭的 EMI 现象

要了解电机电子产品与系统的电磁兼容性问题和相关测试标准法规,我们先要从分析形成电磁干扰现象的基本要素出发,而这些组成要素与相关的干扰能量传输机制也就是相关标准

法规与测试方法的基础。由干扰源发射的电磁能量，经过耦合路径传输到对电磁噪声会有敏感响应的设备，这个过程称为电磁干扰效应。因此，形成电磁干扰的现象必须同时具备三个基本要素（如图 1-3 所示）：干扰源、耦合路径和噪声受体。

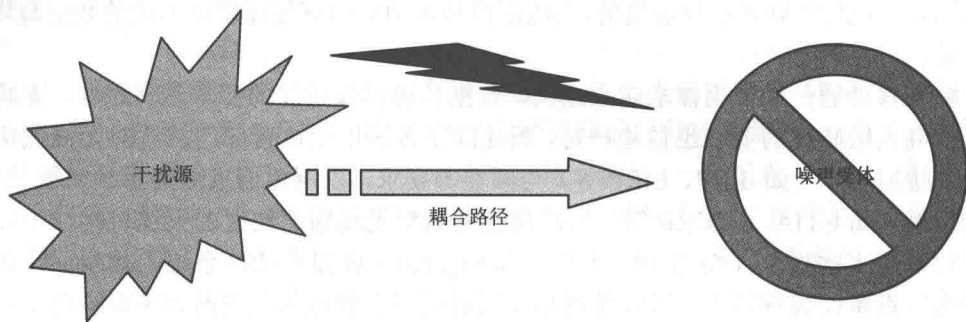


图 1-3 电磁兼容现象的组成要素

(1) 干扰源（或噪声源）。

任何形式的自然雷击与静电现象或人为电能装置所发射的电磁能量，可能使共享同一环境的人或其他生物受到伤害，或使其他设备系统或装置系统发生电磁危害，导致性能降低或失效，这种自然现象或电子装置就称为干扰源或噪声源。如果是航天设备则要考虑宇宙射线及太阳黑子，以及穿过大气层时产生的摩擦放电等干扰现象。不管是静电还是雷击或无线通信等干扰源，其频谱特性都是不相同的，而无线通信则比较简单，因为容易确认通信或广播系统的电磁特性，因此若知道产品操作环境很靠近干扰源，针对雷达、无线通信以及广播电台只要做好滤波与屏蔽即可阻挡噪声干扰，但是静电、雷击以及快速瞬时脉冲等瞬时干扰能量较大，其干扰波形经过傅里叶转换形成宽带分布，所以很难仅用滤波与屏蔽来加以抑制。一般信息类产品的电磁噪声如图 1-4 所示。

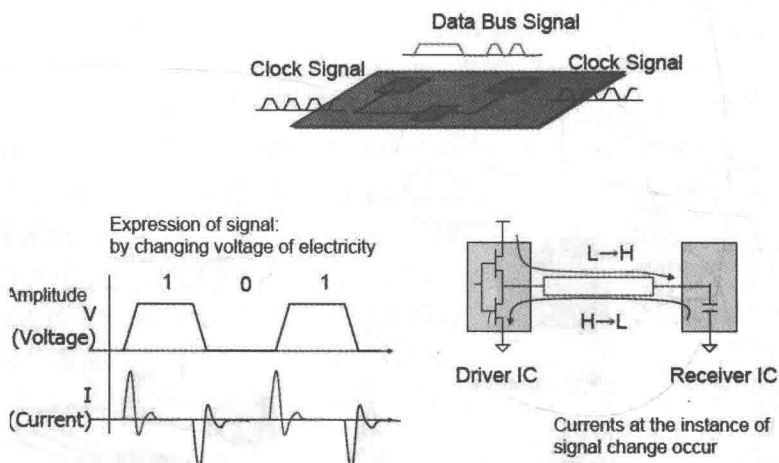


图 1-4 计算机内部 PCB 上数字信号的噪声

其中有传送到驱动器与负载元件的高速频率信号，以便使驱动电路（Driver）与接收负载（Receiver Load）两端元件进行同步，以及由发射端的驱动电路（Driver）传送到负载端的真正有用信号。而从数字电路几乎都是以反相器（Inverter）来看，目前的 IC 可能是由几亿个或

几千万个反相器所组成，而数字逻辑 IC 的等效输入电路就是一个电容，其在状态 LOW 时 P-MOS 开启而 N-MOS 关闭，负载经由电源充电，而在状态 HIGH 时 P-MOS 关闭 N-MOS 开启，负载经由接地放电，因为互补式金氧半 CMOS 反相器在稳态时并没有把电源及接地连接在一起，所以一般都非常省电，但是当状态转换时则会因其间的 P-MOS 与 N-MOS 同时在极短时间内开启，所以瞬间产生极大的噪声电流，而形成明显的干扰源。

### (2) 耦合路径。

耦合路径即传输电磁干扰能量的通路或媒介，它可以是经由导体传输干扰电压或电流的传导路径，或是因电压及电流于电路装置结构激发电场与磁场或电磁场后经由空气辐射的辐射路径，而这二者是由干扰源的频率分布所决定的。任何的系统与外界沟通，不管是通过有线还是无线方式都一定会有暴露的途径，而要有效解决路径的干扰耦合，高频问题可以用电磁波方式解决（屏蔽），低频则可用滤波的方式加以解决。

### (3) 噪声受体（敏感电路或被干扰者）。

噪声受体是指当受到干扰源所发射的电磁能量的作用时会受到生理性伤害的人或其他生物，以及敏感设备会因为发生电磁危害导致性能降低或失效的器件、设备、分系统或系统。许多器件、设备、分系统或系统可以既是干扰源又是敏感的噪声受体设备。

依据上述现象分析，三者只要解决其中一个就可以完成 EMC 设计目的，而从这个角度来看测试规划也是如此，所以如果执行 EMI 测试就通过辐射或是串音（串扰）和传导方式，此时敏感设备就是天线与接收机，若要执行 EMS 测试，那敏感设备就是产品，而此时的电磁干扰源就是像雷击、静电、快速瞬时脉冲等信号产生器，故设计及测试都是通过这三点来加以应用。电磁兼容性标准和规范进而分为两大类：电磁干扰（EMI）和电磁耐受性或免疫力（EMS）测试，在不同频率范围内，采用不同的耦合方式进行；当噪声源为待测物，而噪声受体为量测仪器时，此即为 EMI 测试；反之，如果噪声源为干扰信号的产生仪器，而噪声受体为待测物时，此便为电磁耐受性测试（EMS）。任意电子电机设备可能既是一个干扰源又是一个被干扰者，因而电磁兼容性测试往往包含电磁干扰测试（EMI）和电磁耐受性测试（EMS）。

为了实现电磁兼容性的设计与各类电气产品对应的验证测试，我们必须从上述三个基本要素出发，从技术和组织两方面着手。所谓技术，就是从分析干扰源、耦合路径和敏感设备着手，采取有效的技术，抑制干扰源、消除或减弱干扰的耦合、降低敏感设备对干扰的响应，以及对人为干扰进行限制，并验证所采用技术的有效性。组织，则是制订和遵循一套完整的标准和规范，进行合理的频谱分配，控制与管理频谱的使用，依据频率、工作时间、天线方向性等规定工作方式，分析电磁环境并选择地域，进行电磁兼容性管理等。

电磁兼容性是电子设备或系统的主要性能之一，电磁兼容设计是实现设备或系统规定的功能、使系统效能得以充分发挥的重要保证，因此必须在设备或系统功能设计的同时进行电磁兼容设计。由于电磁兼容设计的目的在于使所设计的电子设备或系统在预期的电磁环境中实现电磁兼容，因此其要求是使电子设备或系统满足 EMC 标准的规定并具有以下两方面的能力：

- (1) 能在预期的电磁环境中正常工作，并且无效能降低或故障的状况。
- (2) 对该电磁环境而言，不是一个电磁污染源而影响周围其他设备的正常运作。

为了实现电磁兼容的环境，我们必须深入研究以下 5 个与标准法规制定息息相关的问题：



(1) 对干扰源的研究,包括干扰源的频域和时域特性、产生的机制及抑制方法等的研究。

(2) 对电磁干扰传播特性的研究,即研究电磁干扰如何由干扰源传播到敏感设备,包括对传导干扰和辐射干扰的研究。传导干扰是指沿着导体传输的电磁干扰,辐射干扰即由组件、部件、连接线、电缆或天线,以及设备系统辐射的电磁干扰。

(3) 对敏感设备抗干扰能力的研究。

(4) 对测量设备测量方法与数据处理方法的研究。电磁干扰十分复杂,测量与评价需要有许多特殊要求,例如测量接收机要有多种检波方式、多种测量频宽、大过载系数、严格的中频滤波特性等,还有测量场地的传播特性与理论值的符合性要求等;如何评价测量结果也是个重点问题,需要应用概率论、数理统计等数学工具。

(5) 对系统内、系统间电磁兼容性的研究。系统内电磁兼容性是指在给定系统内部的分系统、设备及部件之间的电磁兼容性,而给定系统与它运行时所处的电磁环境或与其他系统之间的电磁兼容性即系统间电磁兼容性,这方面的研究需要广泛的理论知识与丰富的实务经验。

此外,还应当指出的是,由于电磁兼容是抗电磁干扰的扩展与延伸,其研究的重点是设备或系统的非预期效果和非工作性能、非预期发射和非预期响应,而在分析干扰的叠加和出现统计概率时,还需要按最差的情况考虑,即“最差原则”,这些都比研究设备或系统的工作性能复杂得多。由于电子产品都必须经过电磁兼容性的测试,配合相关产品的技术与性能要求所对应的标准规范进行最完整和严格的检测,以确保该产品在实际使用的情境下能与其他电子电气产品的操作正常共存。其中一项是主动性的电磁干扰测试,测试电子电气产品或机器在运行过程中是否会产生影响其他系统的电磁干扰噪声,而另一项测试则是被动性的电磁耐受或抗扰能力测试,目的是测试产品或机器在运行过程中,具有忍受周围电磁环境影响的能力,也唯有同时通过这两项检测才能算是安全性比较高的电子产品,才能获得验证上市。因为被动性的电磁耐受性测试相较于主动性的电磁干扰测试较易对待测产品造成破坏性,所以在一般双向性的噪声耦合途径状况下,测试与执行对策排错的顺序就会以电磁干扰测试项目为先。

由于产品操作的电磁环境是否是特定的、可以预期的,其电磁噪声的强度与频率范围会有很大差异,所以在测试标准的最上层,先制定一般或通用标准,这种一般标准会规定要用在工业用的环境、商业用的环境、医疗用的环境、汽车用的环境中因环境效应引起的测试项目与限制值要求,在适用的环境操作下一般产品的性能会有怎样的电磁影响;然后就会说明因为产品须使用在同一电磁环境共容的情况下,所使用的仪器设备或模块(次系统)就不应该产生超过标准规范规定的电磁干扰强度,所以必须据此定义限制值,该限制值是依据目前产品类别的工艺技术与耗电情况在一般使用情况之下它可能产生的噪声水平有多高以及与可能受影响的周围其他产品距离而制定,因此就有在距离三米或十米时,电磁干扰水平不能超过多大的限制值,而这就是规范从信号源端往外传送的电磁干扰发射现象,也就是限制噪声源的电磁辐射。

而另外一个制定电磁干扰限制值的方式则是通过产品或组件的操作环境中的敏感电路电磁耐受度或抗扰度,再定义出噪声耐受余裕度能承受的其他干扰性组件的电磁干扰水平。如放大器、传感器等对电磁噪声的免疫能力,即环境中的设备、次系统的电磁耐受性水平,如汽车电子模块的耐受性标准(ISO 11452-xx)有超过十项的测试,这是因为对汽车来说安全影响因

素最重要,越来越多的动力与电子装置控制系统会不会导致误动作,最常看到就是电子控制系统产生的爆冲和煞车失灵问题,确实是因为电路系统产生问题造成干扰现象,所以就特别有电磁免疫性(抗扰度)的要求,这是因为已经知道汽车行驶的环境中,附近可能有很多的高压电、变电厂、汽车内外的无线通信装置等,那些高压电、变电厂都会产生很强的电场和磁场噪声,若未加以防护则电子控制系统可能会出现問題,抗扰度或 EMS 的能力越强就越不容易遭受干扰,但其对有用信号的敏感度也同样会变差,进而可能影响电路效能。

针对各种电子产品在规范环境的 EMC 要求,各国主管部门都有对应的产品认证规定,例如,卫生部针对所有的医疗产品与设备、交通部针对汽车等交通工具等进行各种频率使用管制规范以及 EMC 规格要求,因为频率是非常昂贵的公众财产,而且也要确保人体的健康,例如手机要管制近场的比吸收率(SAR),是因为发射体靠近人体一般是在 6cm 的距离以内,场强多大可能对人体造成影响,另一个则是管制基站的最大允许曝露量(MPE),通过管制远场电磁波对人体健康的评估,以便让各种设备在复杂的电磁环境中均能正常的运作,而且也不会对人体造成危害,也因此产生了很多 EMC 测试实验室,甚至所有的产品后面都一定会有 EMC 合格标识,以确保产品符合全球各地的对应 EMC 要求,例如 CE 的是欧洲市场, FCC 的是美国市场, VCCI 的是日本市场, BSMI 的是台湾市场。

然而,除了目前针对成品系统所规范的系统间电磁兼容性标准外,系统内性能的电磁兼容性问题,也就是系统内的零部件、电路板、模块、装置等,两两之间也可能会互相干扰影响,因此若将前面的电磁兼容性测试含义引入产品设计的系统整合规划时,即可借助 EMC 设计规划与噪声概算(Noise Budget)的应用,通过部件的摆放布局与信号传输布线改善其 EMC 特性以达到系统间与系统内的 EMC 要求,后续章节会有更详细的应用说明。

## 1-2 电磁兼容的发展趋势

通过前面的 EMC 含义说明我们即可了解 EMC 的目的,也就是在当前科技发展越来越快,系统的整合性越来越强,而产品与组件体积越来越小,在所有功能不变,耗电也没有减少的情况下,如何在一个更小的空间里面,而且组件或装置之间彼此的互相影响越来越明显的趋势下,通过原理分析与仿真来符合 EMC 的设计目标与性能要求。所以在生活中电气及电子设备数量不断增加,而且无线通信频谱使用范围越来越广,尤其是全球积极推行物联网与车联网应用的情况下,EMC 的问题将更加复杂。物联网代表生活周遭与包含人体在内所有的一切都会有各种不同形式的传感器,就像是植入在身体里面,能控制人体的血流、心跳等装置,以及越来越多的环境电子感测与控制对象,让电磁环境越来越复杂,所以除了目前使用到的广播与通信频谱,会因为无线通信的传输速率与频宽需求而将频谱向高频延展,后续也会因为智慧车辆与 ITS(智能型运输系统)的发展而有防撞雷达、车联网与自动导航的技术应用,而且现在汽车的防撞雷达技术已经相当成熟,应用也逐渐普及,目前有部分无人驾驶车即将或已经问市,而无人驾驶车的行驶方式一般要靠与其附近车辆和道路环境进行通信联络与感测控制,以及前后车辆的防撞控制与导航规划,甚至通过地面上的传感器交通分隔线,以防止车辆偏移或偏离车道,以及跟道路旁边的无线网络信号柱(一般为 5.6 或 5.9 GHz)持续进行联网沟通,而在这样的智慧城市环境下,电磁环境只会越来越复杂。

早期的电子产品较少考虑电磁兼容性(EMC)的问题,主要是因为电路速度慢、电子



零部件因操作时供应电压较高而有较大的噪声余裕度、无线通信系统尚未形成复杂的电磁环境或污染，以至于在产品周期长的情况下，商用产品的设计多强调自身功能而非使用时的电磁环境效应。所以过去在设计电路布局或走线时，因为频率较低、信号波长不足以导致传输线效应，因此 EMC 设计必须考虑的因素相对来说并不多，只要遵守基本安全规则就足够了，但随着半导体制程的发展、系统接口传输速度的增加、数字电路操作的频率上升，在传输线效应与电磁场耦合效应逐渐明显的情况下；同时，在其操作频率快速提升、供应电压渐渐降低，但消耗功率在效能提升的前提下却不减反增（遵循着 Moore 定律的半导体制程法则），以至于在 IC 的电磁耐受度上面更明显遭遇严重问题，因此传统的电路设计规则已渐渐无法防止电磁效应所产生的干扰影响；同时，IC 设计已进入到封装系统（System in Package, SiP）与芯片系统（System on Chip, SoC）设计，甚至是三维制程（3D IC）的先进半导体时代，因此电磁兼容领域的研究最近几年也渐渐从传统的频谱管制、系统产品规范演变到将 EMC 的设计与规范运用到模块与 IC 上，以便在系统的设计整合阶段即可将噪声概算的观念导入组件的质量管理范围，及早从电磁干扰源端有效达到电磁兼容性设计的目的，也就是说，EMC 设计必须提升到研发的境界，从系统整合的观念来思考产品的性能规划与规范要求，而不再像传统的 EMC 管制流程，等到产品开发完成进入性能测试与标准验证阶段再要求产品开发链最下游或最低阶的 EMC 工程师通过各种补丁式的滤波或屏蔽技巧来进行事后补救，那样不仅增加对策材料的成本，更会延误产品上市的时机。

在现今电子信息技术日益普及的数字化社会，笔记本电脑及移动通信设备的使用需求越来越大。对于想要随时随地上网、执行导航定位、体验移动创新应用的消费者和专业人士来说，高速数字运算与各种无线通信模块已经变成移动设备不可或缺的一部分。为确保在此种数字经济发展的过程中所有的便携式移动设备能够正常运行，以及减轻恶劣的电磁环境对人体及生态产生不良影响，加上民众的环保意识抗拒基站在住家邻近区域建置，使得一般型稍大功率的基站数目会越来越来少，因为基站的覆盖范围如果要大，那么发射功率就必须要强，但大的发射功率对邻近居民的健康就可能造成影响，因此随着无线通信产业与技术的发展，基站已经逐渐朝覆盖率较小但可更有效提升频谱使用效率与数据传输率的小细胞方式建置（如 Pico-Cell 或 Femto-Cell），对电信系统业者而言虽然必须增加建置数量与成本，但可以配合比较小的基站发射功率，因为信号强度可能也会相对下降，在不影响通信质量的条件下就必须改善无线设备的接收灵敏度。此外，因为无线或移动产品内一般都包含数个不同系统的无线通信模块（例如个人网络 Bluetooth、局域网络 802.11x、移动网络 WCDMA 或 LTE、定位导航 GPS 等），若要各模块间在收发之际能够兼容共存，EMC 的设计也必须从系统整合的角度来看，如 RF 射频模块、天线、数字电路、模拟敏感电路等如何将其组合在一起才会获得最好的性能，而且每个产品内部都有各种不同的功能模块，要能够让彼此共存而不相互产生干扰就必须靠组件摆置、PCB 布局走线等技术使产品能够符合电磁试验与性能规格的要求。

而随着半导体产业的蓬勃发展，数字组件的速度与效能也逐渐向上延伸，加上消费性电子产品流行、无线通信设备的小型化且附加功能越来越强大的趋势下，在越小体积的平台下放入更多的无线设备和功能更强大的数字系统，在越多模块同时作用下（如笔记本电脑内部加入 GSM、WLAN、GPS、Bluetooth、DVB-H 等天线模块时），系统设计工程开发人员所需要注意