



丛书

# 电磁兼容性原理与技术

电子工业部第十四研究所

# 电磁兼容性原理与技术

Christos Christopoulos

总校 邵智民  
徐进



电子工业部第十四研究所

45839

2022/07  
内 容 简 介

该书吸取了近期电磁兼容性(EMC)最新的研究的理论和实践,全面介绍了EMC理论、分析、预测以及电磁干扰(EMI)控制技术等,并以众多实例讲述了在系统中达到EMC的设计方法和手段,文中还介绍了EMC标准(如MIL-STD-461D等)以及EMC测量和试验的有关内容等。该书为从事EMC研究者提供若干有价值的原始材料和最近研究的参考资料。

全书分四大部分,十四章。

本书可供从事EMC分析、设计和测试的工程技术人员阅读,也可作为高等院校的教材或参考书。

---

## Principles and Techniques of Electromagnetic Compatibility

Christos Christopoulos,

CRC Press, Inc. 1995

ISBN 0-8493-7892-3

---

电磁兼容性原理与技术

责任编辑 周南

\*

《SSS》丛书编辑部出版

十四所情报信息中心轻印刷组印制

\*

内部书号:SSS-019

## 出版前言

在我们所从事的设备研制工作中,电磁兼容性(EMC)始终是一项极为重要而又复杂的问题。从理论和实践两方面加强对 EMC 的认识和研究是显得何等的迫切!

本书从物理概念的解释,数学公式的表达以及工程设计研究等方面,介绍了复杂系统中的 EMC 有关理论、分析方法、预测手段及电磁干扰(EMI)控制技术,并给出了 EMC 标准和测试方法,这无疑对科研人员和工程技术人员而言是一本较为实用的参考书。为此,我们组织了有关人员编辑出版此书以飨读者。

电子部第十四研究所五部的部分工程技术人员和情报室的同志参加了本书的翻译、校对工作,情报室编辑出版组的同志参加了部分编辑、校对工作。对于他们的大力帮助和支持,我们在此表示深深地感谢。

由于我们水平有限、时间仓促,书中难免有不当之处,还请广大读者予以批评指正。

电子工业部第十四研究所 五部 邵智民

## 绪 言

电磁兼容性(EMC)实现的途径也许来自两种观点。第一种途径是,试图阐明问题的普遍性,并且寻求开发预测性能的通用工具。由于问题如此复杂,使得至今不可能沿着该途径作出决定性的进展,留下的是直接范围有限的数学处理方法的集合。这也是一种普遍的情况,用该方法不能轻易获得问题的物理解,因为数学的复杂性决定了一切。

另一个途径是在日积月累基础上,从面临设计师的实际问题的多样性来考虑 EMC。这种工作的通常表现是在理论概念、实际经验、神奇技巧的综合的基础上的“EMC 技巧和经验”的集合,在某些环境下这无疑是在行得通的。然而,对从事 EMC 工作的学生来说,他们却不能对正在发生的事情有一个清晰而准确的物理解,或者,对他们所使用公式的有效适用范围缺乏了解。

这本书采用了不同的观点。重点放在对日益复杂的系统中有关电磁相互作用的理解。每当寻求物理描绘没有益处,而且徒劳无功时,也求助于数学工具。

文中还包括许多近似的方法和直观的概念,并且努力说明每一种方法的局限性。当读者开始理解到 EMC 相互作用的物理意义,并且熟悉某些数学工具以后,本书将描述系统设计和实现 EMC 的方法,并用实际的例子加以说明。当读者逐渐熟悉 EMC 的物理、数学以及工程的各个方面以后,他们将发现自己对预测复杂系统的性能,仍感到缺乏足够的信心。为了对付问题的复杂性,数值方法有了发展,书中陈述了这些方法的基础和能力。希望本书为 EMC 的重要研究提供有用的源材料,书中包含了许多近期研究的参考文献。

本书旨在内容广博,然而象 EMC 内容如此广泛的领域,要对呈现在所有读者面前所包括的资料进行选择却是困难的。本书适用于

那些从事于 EMC 分析和设计的高年级大学生、研究生以及企业中的 EMC 工程师。作者由于培训和兴趣,倾向于对各种问题采取全面的看法,他希望读者以反映他们自己背景和兴趣的步调有选择地研究该书。然而对初读者来说,如需要对研究的课题作一选择,那下面建议的两种办法可作为指南:

- 1) 与 EMC 应用有关的读者——第 1 章;第 2.1、3.1、4.1、4.4 节;第 5 章;第 III 和第 IV 部分的所有材料。
- 2) 与 EMC 分析有关的读者——第 I 和第 II 部分以及第 13 章的所有材料。

第一部份包含的材料讲述电气和电子工程方面的内容,都与 EMC 有关。拥有电气工程单位的读者对这些材料的大部分将是熟悉的。第二部分涉及 EMC 的一般概念和技术,因而对那些从事于预测系统 EMC 性能的人是会有用的,用于控制电磁干扰以及产品中 EMC 设计的较实用技术,在第 III 部分讲述。最后,在第 IV 部分描述了主要的 EMC 标准和测试技术。

多年来,我很荣幸地感谢我所得到的来自诺丁汉大学和来自其它高等教育机构的同事以及来自对 EMC 研究作出资助的企业和政府实验室的人给予的帮助和支持,这有助于我对该课题的理解。Miss S. E. Hollingsworth 熟练地打印了大部分手稿,对她的工作我表示谢意。

C. Christopoulos  
Nottingham

# 目 录

第一部分 基本概念和技术 .....	(1)
第一章 电磁兼容性导论 .....	(2)
第二章 电磁场 .....	(5)
2.1 静态场 .....	(6)
2.1.1 电场 .....	(6)
2.1.2 磁场 .....	(15)
2.2 准静态场 .....	(22)
2.2.1 电路和电场间的关系 .....	(24)
2.2.2 电磁势 .....	(28)
2.3 高频场 .....	(31)
2.3.1 电磁波 .....	(31)
2.3.2 辐射系统 .....	(36)
参考文献 .....	(46)
第三章 电路元件 .....	(47)
3.1 集总电路元件 .....	(47)
3.1.1 理想的集总参数元件 .....	(47)
3.1.2 实际的集总参数元件 .....	(49)
3.2 分布电路元件 .....	(54)
3.2.1 传输线的时域分析 .....	(57)
3.2.2 传输线的频域分析 .....	(60)
参考文献 .....	(66)
第四章 电信号和电路 .....	(67)
4.1 信号用较简单信号表示 .....	(68)

4.2	信号的相关特性	(77)
4.2.1	一般的相关特性	(77)
4.2.2	随机信号	(78)
4.3	线性电路对确定信号和随机信号的响应	(80)
4.3.1	脉冲响应	(81)
4.3.2	频率响应	(81)
4.3.3	噪声中信号的检测	(83)
4.4	非线性电路的响应	(86)
4.5	噪声特性	(87)
参考文献		(94)
第二部分 EMC 的一般原理和技术		(95)
第五章 电磁干扰源		(95)
5.1	电磁干扰源的分类	(95)
5.2	自然电磁干扰源	(96)
5.2.1	低频电场和磁场	(96)
5.2.2	闪电	(97)
5.2.3	高频电磁场	(98)
5.3	人为电磁干扰源	(100)
5.3.1	无线电发射机	(100)
5.3.2	热电应用	(101)
5.3.3	数字信号处理与传输	(101)
5.3.4	电源调整和传输	(102)
5.3.5	开关瞬态	(105)
5.3.6	静电放电(ESD)	(114)
5.3.7	核电磁脉冲(NEMP)	(117)
5.4	电磁环境的综述	(119)
参考文献		(120)
第六章 对屏蔽和孔隙的穿透		(123)



6.1	引言 .....	(123)
6.2	屏蔽理论 .....	(124)
6.2.1	屏蔽效能 .....	(125)
6.2.2	近似方法——电路逼近 .....	(125)
6.2.3	近似方法——波逼近 .....	(136)
6.2.4	屏蔽问题的解析解 .....	(139)
6.2.5	不同频率下屏蔽效能总论 .....	(141)
6.2.6	表面传输阻抗和电缆屏蔽 .....	(142)
6.3	孔隙理论 .....	(146)
6.4	对屏蔽和空隙穿透的数值模拟 .....	(153)
6.4.1	数值方法的分类 .....	(153)
6.4.2	频域法的应用 .....	(155)
6.4.3	时域法的应用 .....	(157)
6.5	与屏蔽有关的进一步的研究 .....	(162)
参考文献 .....		(162)
第七章	传播和串扰 .....	(166)
7.1	引言 .....	(166)
7.2	基本原理 .....	(169)
7.3	导线参数计算 .....	(175)
7.3.1	分析方法 .....	(175)
7.3.2	数值方法 .....	(179)
7.4	外场电磁耦合的表示 .....	(181)
7.5	由传输线产生的电磁场的确定 .....	(189)
7.6	传播研究的数值模拟方法 .....	(191)
参考文献 .....		(192)
第八章	系统间电磁耦合的仿真 .....	(196)
8.1	概述 .....	(196)
8.2	源/外部环境 .....	(197)
8.3	穿透和耦合 .....	(198)

8.4	传播和串扰 .....	(203)
8.5	设备的敏感度和发射 .....	(203)
8.6	数值仿真方法 .....	(204)
8.6.1	有限差分时域法(FD-TD) .....	(205)
8.6.2	传输线模型法(TLM) .....	(205)
8.6.3	矩量法(MM) .....	(206)
8.6.4	有限元法(FE) .....	(206)
参考文献 .....		(207)
第九章 电磁干扰对器件和系统的影响 .....		(211)
参考文献 .....		(213)
第三部分 干扰的控制技术 .....		(214)
第十章 屏蔽与接地 .....		(215)
10.1	设备屏蔽 .....	(215)
10.1.1	衰减的实际电平 .....	(215)
10.1.2	屏蔽材料 .....	(215)
10.1.3	传导渗透 .....	(216)
10.1.4	裂缝、接合口和衬垫 .....	(217)
10.1.5	谐振阻尼 .....	(219)
10.1.6	屏蔽效果测量 .....	(219)
10.2	电缆屏蔽 .....	(219)
10.2.1	电缆传输阻抗 .....	(220)
10.2.2	电缆屏蔽接地 .....	(221)
10.2.3	电缆接头 .....	(222)
10.3	接地 .....	(222)
10.3.1	在大尺寸系统中的接地 .....	(223)
10.3.2	独立设备的接地 .....	(226)
10.3.3	在若干互联设备环境下接地 .....	(226)
参考文献 .....		(228)

第十一章	滤波器和非线性保护设备 .....	(230)
11.1	电源线滤波器 .....	(230)
11.2	隔离 .....	(233)
11.3	平衡 .....	(235)
11.4	信号传输线滤波器 .....	(236)
11.5	非线性保护设备 .....	(237)
参考文献	.....	(243)
第十二章	EMC 设计通用原则 .....	(244)
12.1	减少源辐射 .....	(244)
12.2	减少耦合途径 .....	(245)
12.2.1	工作频率和上升时间 .....	(245)
12.2.2	反射和匹配 .....	(248)
12.2.3	接地路径和接地平面 .....	(249)
12.2.4	电路隔离和布局 .....	(249)
12.2.5	电缆布线 .....	(251)
12.3	抗扰性的改善 .....	(251)
12.3.1	通过软件设计提高抗扰性 .....	(253)
12.3.2	扩频技术 .....	(254)
12.4	EMC 管理 .....	(257)
参考文献	.....	(257)
第四部分	EMC 标准和测试 .....	(259)
第十三章	EMC 标准 .....	(259)
13.1	对标准的要求 .....	(260)
13.2	国际机构 .....	(260)
13.3	民用 EMC 标准 .....	(261)
13.3.1	FCC 标准 .....	(261)
13.3.2	欧洲标准 .....	(263)
13.3.3	其它 EMC 标准 .....	(266)

13.4	军用标准 .....	(266)
13.4.1	军用标准 MIL-STD-461D .....	(266)
13.4.2	国防标准 DEF-STAN59-41 .....	(268)
13.5	商用标准 .....	(270)
13.6	人在电磁场中的暴露极限 .....	(270)
参考文献	.....	(271)
第十四章	EMC 测试 .....	(273)
14.1	EMC 测量技术 .....	(273)
14.2	测量工具 .....	(274)
14.2.1	信号源 .....	(274)
14.2.2	接收机 .....	(275)
14.2.3	场探测器 .....	(276)
14.2.4	天线 .....	(277)
14.2.5	辅助仪器 .....	(281)
14.3	测试环境 .....	(282)
14.3.1	开阔测试场 .....	(282)
14.3.2	屏蔽室 .....	(285)
14.3.3	专用的 EMC 试验舱 .....	(289)
参考文献	.....	(290)

# 第一部分 基本概念和技术

在电气工程的若干领域内,任何重要的电磁兼容性(EMC)研究都需要合理的背景。象 EMC 这样的题目,实际问题的复杂性是很值得考虑的,想在广泛的定量的模型基础上提供完整和精确的答案,并非总是可能的。在这样的情况下,对电气元件的本质、它们通过电磁场的相互作用、以及电信号的本质和特性等,有根本的坚实的理解,是必不可少的。这样的一个基础,就恰当的问题、有分寸地评价结果和假设、保障在合理而科学理解的基础上直观地寻求解答,给分析人员和 EMC 设计师提供了基本的概念框架和工具。甚至,对那些不适应物理系统及处理的数学模型的人们,通过对第一部分的研究将大大受益,因为它们是与研究 EMC 现象有重大关系的技术精华。那些已经熟悉场、电路和信号的人们,可能也希望研究第一部分,因为书中阐述了与 EMC 前景有关的论题。

后续四章旨在对 EMC 的属性和重要性、电磁场的概念、用理想元件对实际元件的描述、以及场和电路原理之间相互关系等方面提供背景材料。最后,将描述在频域和时域中信号和电路的建模和分析。

## 第一章 电磁兼容性导论

电磁兼容性(EMC)是自然科学和工程学的一个分支,在某种意义上它与设备设计和工作有关,它使得设备免除某种程度的电磁干扰,同时要求设备产生的干扰保持在规定的极限之内。EMC 的范畴很广,因为它实际上包括了所有由电源供电的设备。实际上,所有工程系统都含有电源调整和信息处理单元,因而都属于 EMC 范围内的设备。感兴趣的频率范围由 DC 扩展到光波和在这个频谱中某些部分,一个严格的国际管理组织已经建立并确保设备对电磁干扰的抗扰性(EMI),且控制其发射。

EMC 的利害不是最近发现的。从无线电早期以来,设计者和听众就已同样关心噪声、干扰、以及接地的问题。然而,无线电通讯、数字系统、快速处理器等应用的快速发展,以及新的设计经验的推广,已把 EMC 推到了先进设计的前沿。三种技术趋势为这些变化提供了动力。首先,现代的数字逻辑和信号处理与基于电(几百伏特)的旧技术相比有低的门限电压(如,几伏特数)。所以现代系统的抗扰性本来就低。第二,在追求高处理速度的过程中,使用了较短的脉冲上升时间,在高频贡献了相当数量的能量,它们根据辐射机理具有在长距离上传播的能力。第三,现代设备的结构设计日益基本上使用塑料而少使用金属,显然,对全金属机箱这大大降低了其固有的电磁屏蔽。在这份清单上还可以增加其它几个项目,比如小型化以及由此而引起的密集设计的趋势所带来的 EMC 问题。因此,在设计的所有阶段都必须密切注意 EMC、设备是否适当地运行以及是否符合国际 EMC 规范。

EMC 可以从两个不同的方面着手处理。首先,它可以主张在任何设计之初就必须完成完整的 EMC 研究,以预测设备电磁特性以及其对抗外部产生的干扰的能力。完成这样的研究,困难是令人生畏

的,因为许多必要的先验的分析和数学工具目前还不是现成的,并且通常不能充分地说明设备所处的环境。第二,也许认为 EMC 本质上是一种“消防”行为,在这个领域可能出现的一些问题都是在某一特定环境基础上的最佳处理。因为现代设计的复杂性以及 EMC 的特性不能用容易而便宜的办法解决,作为事后弥补措施,这一做法显而易见是危险的。EMC 折衷的方法是设计师提供的在该领域各种有效的方法。这包括数学工具,内部的实践经验,对 EMC 以及电磁相互作用的充分物理解。没有哪一个人在所有的领域都是天才,因而建立一个具有合适经验以及问题解决途径的团体是很重要的,它构成了 EMC 设计的焦点。几年来在工程教育中强调数字设计,从而使大学毕业生中暴露的问题说明射频(RF)设计项目已下降至危险的低水平,因此,在学术界和企业中,加强对 EMC 的认识以及掌握基本的 RF 设计技术是相当重要的。

必须认为,EMC 是影响到设计所有方面——电气、电子、机械各个方面的一个课题。它不可能单独地满足要求。一般说来,一个完整的设计可以由一系列的子系统组成,它们通过信号线和电源线以及通过电抗(容性的/或感性的)或者辐射机制相互作用。当今 EMC 研究的目的是发展必要的方法和工具实现 EMC,但是完整系统的 EMC 性能不可能轻易地从子系统已知性能中预测。在新旧技术混合应用的大型系统中,在严酷的外部电磁(EM)威胁下,困难是显著的。明显地,设计师将作出各种努力,去解决在设备的某一部分中由不同的子系统之间相互作用引起的 EMC 的问题。然而,多数的 EMC 问题看来都是内部产生的。在一个集成系统中,内部有许多不同类型的设备,通常由不同的电源供电,并连在一起,会产生 EMC 问题,如果各个单元不符合规定的 EMC 极限并且系统级的 EM 相互作用没有充分的考虑,那问题将很难处理。

然而,开发了成功地运行的系统的设计师,一直要涉及到系统内部产生的电磁干扰(EMI),应该满足国家和国际 EMC 标准规定的极限。对这些极限的符合可以在规定的条件下通过一系列试验加以

证明 在典型的情况下,这些试验包括来自设备的 EMI 发射以及设备对外部产生的电磁干扰的敏感性或抗扰性。在发射测试中,应依据特定的标准,布置设备,并在屏蔽室或开阔场地进行,在规定的频率范围内使用规定带宽的接收机,测量在规定的距离上发射的电磁场。所用天线的类型和极化也按规定制造,只要可能,测量是可重复的。为有别于测量导体上 EMI 电压的传导发射,这种类型的测试称为辐射发射试验。在各种情况下测到的数量必须低于规定的极限。这些极限的选择以及测试程序的更详细的描述在第 13 章和第 14 章中给出。

在抗扰性试验时,设备遭到规定的外部产生的电磁场或在导体上注入的干扰电流的作用,此时要求设备保持原功能。这些测试可以覆盖一个宽的频率范围(典型的上限是 1GHz),也可以是包含脉冲状的入射电磁信号,以便检验设备对瞬态和静电放电的响应。对于具有很多工作模式的复杂设备,要证明其抗扰性是困难的。

设计师必须确定来自设备的不同部位 EM 发射的本质和意义,并且确定外部产生的干扰对整个系统总体功能的影响。我们应该尽可能设法降低干扰源处产生的干扰,并通过适当的布局、屏蔽、滤波以及接地等手段,降低或消除耦合途径,设计对干扰具备固有抗扰性的硬件,采用防护程序措施,来开发对 EMI 具有高水平抗扰性的软件。这些选择中没有几种是不花成本的,而且其中多数也许对设备正常工作特性、尺寸、外观和重量具有相反的效果。对这些设计问题要寻找最佳的方案不是一件容易的事情,它依赖于如此多的相互依赖的参数。研究 EMC 的目的是要求开发能进行最佳化 EMC 设计的方法和工具,以便最初被贯彻到设计过程中去,因此,甚至在概念的设计阶段,就应该考虑 EMC 的问题,并用最少的费用作出明智的选择

浏览后续各章节的题目,将使读者相信,由于 EMC 的复杂性和重要性,它在教学和先进的系统设计技术的研究中,都处于前沿的地位。

(徐进译)  
(郭燕昌校)



## 第二章 电磁场

本章的目的是以广义的措词重新概述电磁场理论的基本前提，并建立诸如应用于 EMC 电磁现象的基本概念和模型。就象本书中大部分章节的情况那样，这里并不想给出有关专题的完整论述。读者可以参阅有关电磁学的许多优秀参考书，见参考文献[1~4]。所研究的专题处在大学一年级学生的水平上，选自我的“应用电磁学导论”(Wiley, 1990)<sup>(5)</sup>。

没有对什么是电磁学最起码的实际了解，就不会获得对 EMC 的牢固认识。如果在基本认识之后有能力作出 EMC 性能的定量预测，则还需要了解通常与研究对象有关的分析设备。即使是在 EMC 研究中采用数值预测仿真软件包时，情况依然如此。根据作者观点，没有什么可以代替对电磁学基础知识的认识。因而用本章来专门讨论这一重要专题是合适的。按照有大致三类区别来研究电磁现象是方便的。

第一类，存在着电荷静止或匀速运动(如直流)的问题。这类问题在直流和低频应用中常常遇到，在此范围内，场的基本特性是，场的两种样子，即电场和磁场，可单独处理。电场和磁场间的耦合很弱，因而可以提出简单模型来分别进行研究。

第二类，存在着电荷缓慢加速的问题，因而电场和磁场间的耦合虽然不能忽略，但在解释发生了什么问题时可以对假设作一定的简化。

最后一类，在电荷快速加速的情形，无法做任何近似，并且为考虑电场和磁场间的强耦合，必须采用最普通的场模式。

头两种分类可看作静态和准静态近似。这一章的工作是概述适