



电源系列丛书

电磁兼容技术

屏蔽·滤波·接地·浪涌·工程应用

周志敏 编著
纪爱华

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



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

TN86-41
172
1.86

电源系列丛书

电磁兼容技术

屏蔽·滤波·接地·浪涌·工程应用

周志敏 纪爱华 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书结合电磁兼容技术的发展和工程应用,以电磁兼容设计和工程应用为核心内容,系统地讲述了电磁兼容与电磁干扰、屏蔽技术、滤波技术、接地技术、浪涌抑制技术及 PLC 控制系统的抗干扰设计和 PCB、开关电源、供电电源、变频调速系统等的电磁兼容设计。在写作上,采用理论与工程应用相结合的方式,深入浅出地阐述了电磁兼容设计中经常涉及的理论知识和设计方法。全书文字通俗,重点突出,内容新颖实用。

本书可供电信、信息、航天、军事及家电等领域从事电磁兼容技术设计和应用的工程技术人员及高等院校师生阅读参考。

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

电磁兼容技术:屏蔽·滤波·接地·浪涌·工程应用/周志敏,纪爱华编著. —北京:电子工业出版社,2007. 9
(电源系列丛书)

ISBN 978-7-121-04588-2

I. 电… II. ①周… ②纪… III. 电磁兼容性 IV. TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 088599 号

责任编辑:富 军 文字编辑:徐 萍

印 刷:北京市海淀区四季青印刷厂

装 订:涿州市桃园装订有限公司

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:787×1092 1/16 印张:25.5 字数:652.8 千字

印 次:2007 年 9 月第 1 次印刷

印 数:5000 册 定价:42.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,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 zlts@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

随着电力电子技术日益向高频率、高速度、宽频带、高精度、高可靠性、高灵敏度、高密度（小型化、大规模集成化）、大功率、小信号运用和复杂化方向发展，当今电气、电子产品的数量越来越多，特别是电子设备的发射功率越来越大，电气、电子设备及其构成的系统灵敏度越来越高，且接收微弱信号的能力越来越强；同时，电子设备频带也越来越宽，尺寸越来越小，相互影响也越来越大。因此，电磁干扰不再局限于辐射，还要考虑由感应、耦合、传导、静电、雷电等引起的电磁干扰。

电磁兼容（Electromagnetic Compatibility, EMC）技术又称环境电磁学，是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；也是一门研究在有限的空间、时间和频率资源条件下，各种电气、电子设备或系统在同一电磁环境中可以相互兼容，而不致引起其性能降低的应用科学技术。电磁兼容技术现已成为当今世界“工业技术的热点问题”。电磁兼容是电气、电子设备工程设计的重要指标，也是产品质量、可靠性的重要指标。

电磁干扰（Electromagnetic Interference, EMI）已成为电气、电子设备及其构成的系统正常工作的突出障碍，因而开展电磁兼容研究日显重要。一些国家成立了专门机构，制定专门标准进行管理，一切电气、电子设备必须经过专门机构的鉴定和批准才能进入市场。为此，电气、电子设备的设计必须考虑电磁兼容问题。

为满足我国电磁兼容的研究、教学和工程应用的需要，我国颁布了系列电磁兼容国家标准。本书结合国内外电磁兼容技术的发展方向，系统地介绍了电磁兼容技术的发展、电磁兼容技术的基本理论知识及其典型应用的技术特性，重点介绍电磁兼容技术的工程设计与应用技术。全书尽量做到有针对性和实用性，并力求做到通俗易懂和结合实际，使从事电磁兼容技术开发、设计、应用的技术人员从中获益。读者也可以此为“桥梁”，系统、全面地了解 and 掌握电磁兼容技术的设计和应用技术。

本书无论是资料的收集还是技术信息的交流，都得到国内外专业学者的支持，在此一并向他们表示衷心的感谢。

由于时间短，加之作者水平有限，书中难免存在不妥之处，敬请读者批评指正。

编著者

目 录

第1章 电磁兼容与电磁干扰	1
1.1 电磁兼容性	1
1.1.1 电磁兼容学科的发展	1
1.1.2 电磁兼容技术面对的挑战	6
1.2 电磁干扰及其传播途径	8
1.2.1 电磁干扰源与电磁干扰	8
1.2.2 电磁干扰的传播途径	17
1.2.3 传导干扰	19
1.2.4 辐射干扰	26
1.3 电磁兼容控制技术	28
1.3.1 抗扰度电平与电磁敏感度	28
1.3.2 电磁兼容设计要点	30
第2章 屏蔽技术	41
2.1 屏蔽理论及屏蔽效能评价	41
2.1.1 屏蔽理论	41
2.1.2 屏蔽效能评价	44
2.2 屏蔽的分类及屏蔽材料	49
2.2.1 屏蔽的分类	49
2.2.2 屏蔽材料	55
2.2.3 屏蔽材料的类别	57
2.2.4 屏蔽衬垫	63
2.3 屏蔽设计	65
2.3.1 屏蔽体的设计	65
2.3.2 机箱的屏蔽设计	71
第3章 滤波技术	80
3.1 滤波器及其结构	80
3.1.1 滤波器	80
3.1.2 滤波器的分类与参数	83
3.2 EMI 滤波器	89
3.2.1 EMI 信号滤波器	89
3.2.2 EMI 滤波连接器	91
3.2.3 EMI 电源滤波器	95
3.3 滤波器的设计	100
3.3.1 滤波器的设计方法	100
3.3.2 电源滤波器的设计	101
3.4 滤波器的选择和安装	111
3.4.1 滤波器的选择	111

3.4.2 滤波器的安装	115
3.5 滤波电容器与铁氧体抑制元件	120
3.5.1 滤波电容器	120
3.5.2 铁氧体在抑制 EMI 中的应用	123
3.6 EMI 滤波器的发展趋势	135
第 4 章 接地技术	139
4.1 地线与接地技术	139
4.1.1 地线的定义与接地目的	139
4.1.2 地线阻抗干扰	144
4.2 接地的分类与接地方式	148
4.2.1 接地的分类	148
4.2.2 接地方式	155
4.3 接地系统设计	162
第 5 章 浪涌抑制技术	169
5.1 雷电干扰的防护	169
5.1.1 雷电干扰	169
5.1.2 雷电波侵入	174
5.1.3 雷电干扰防护措施	175
5.2 瞬态干扰的抑制	178
5.3 浪涌抑制器件	183
5.3.1 放电管	183
5.3.2 氧化物压敏电阻	187
5.3.3 TVS 瞬态干扰抑制器	191
5.3.4 便携设备电源的 ESD 保护器件	199
5.4 电子设备的端口防护技术	205
第 6 章 PCB 电磁兼容设计	212
6.1 PCB 设计中的电磁兼容技术	212
6.1.1 PCB 的电磁兼容性	212
6.1.2 PCB 布局设计	215
6.1.3 PCB 布线设计	217
6.2 PCB 的电磁兼容设计	233
6.2.1 PCB 的可靠性设计	233
6.2.2 PCB 中带状线、电线与电缆之间的串音和电磁耦合	238
6.2.3 PCB 分层堆叠在控制 EMI 辐射中的作用	242
6.2.4 抑制 EMI 的 PCB 制造新技术	245
6.3 PCB 信号回路设计	247
6.3.1 数字信号和混合信号 PCB 设计	247
6.3.2 高速信号和高频信号 PCB 设计	252
6.4 PCB 信号完整性与 EMC 设计	261
6.4.1 信号完整性	261
6.4.2 信号完整性设计方法	264



第 7 章 开关电源电磁兼容设计	270
7.1 开关电源的电磁干扰	270
7.1.1 开关电源中的电磁干扰源	270
7.1.2 开关电源中 EMI 的传播方式	277
7.2 开关电源电磁兼容技术	284
7.2.1 开关电源 EMI 抑制技术	284
7.2.2 开关电源 EMC 新技术	295
7.2.3 开关电源 EMI 的滤波器	299
7.2.4 开关电源 EMI 滤波器技术特性	303
7.2.5 开关电源电路的 EMC 设计	307
7.2.6 开关电源 PCB 布局及布线	310
7.2.7 开关电源 PCB EMC 辅助设计的软件方法	313
第 8 章 供电电源电磁兼容设计	316
8.1 供电电源的电磁兼容性	316
8.1.1 供电电源的系统方案	316
8.1.2 供电系统雷电抗干扰技术	320
8.2 电涌保护器 (SPD) 的应用	328
8.2.1 SPD 的特性参数	328
8.2.2 SPD 的配置与选择原则	329
第 9 章 PLC 控制系统的抗干扰设计	334
9.1 PLC 控制系统的电磁兼容性	334
9.1.1 PLC 控制系统的干扰源及传播途径	334
9.1.2 抑制电网尖峰脉冲干扰的措施	338
9.1.3 PLC 控制系统中的硬件抗干扰技术	339
9.2 PLC 控制系统的抗干扰设计	352
9.2.1 PLC 控制系统电源的抗干扰设计	352
9.2.2 PLC 控制系统信号回路的抗干扰措施	356
9.2.3 PLC 控制系统周边控制回路的抗干扰措施	360
9.2.4 PLC 通信抗干扰技术	361
9.3 PLC 控制系统中的软件抗干扰措施	364
9.3.1 PLC 控制系统软件抗干扰技术	364
9.3.2 PLC 控制系统软件运行过程中的监视	370
第 10 章 变频调速系统电磁兼容设计	373
10.1 变频器的电磁兼容性	373
10.1.1 变频器的电磁环境	373
10.1.2 变频系统的 EMI 源传播途径	380
10.2 变频调速系统的抗干扰设计	381
10.2.1 变频调速系统中的共模噪声及抑制	381
10.2.2 变频器输入、输出滤波器的应用	386
10.2.3 变频器周边控制回路的抗干扰措施	393
参考文献	398

第 1 章

电磁兼容与电磁干扰

1.1 电磁兼容性

1.1.1 电磁兼容学科的发展

1. 电磁兼容的定义

电磁兼容，顾名思义，“兼容”即“兼顾”、“容忍”，但电磁兼容并非指电与磁之间的兼容，电与磁是不可分割的，是相互共存的一种物理现象、物理环境。国际电工委员会对电磁兼容性（Electro Magnetic Compatibility, EMC）的定义是：“EMC 是电子设备的一种功能，电子设备在电磁环境中能完成其功能，而不产生不能容忍的干扰。”这里包含两层意思，即电子设备工作中产生的电磁辐射要限制在一定水平内；另外，电子设备本身要有一定的抗干扰能力。EMC 有其非常广的含义，电磁能量的检测、抗 EMI（Electromagnetic Interference）性试验、检测结果的统计处理、电磁能量辐射抑制技术、雷电和地磁等自然电磁现象、电场磁场对人体的影响、电场强度的国际标准、电磁能量的传输途径和相关标准及限制等均包含在 EMC 之内。

我国最近颁布的 EMC 国家标准中，对 EMC 的定义是：“设备或系统在其电磁环境中能正常工作且不对该环境中任何事物构成不能承受的电磁干扰（Electromagnetic Interference, EMI）的能力。”这里所讲的电磁环境是指存在于给定场所的所有电磁现象。这表明 EMC 有双重含义：电子设备或系统不仅应具有抑制外部 EMI 的能力，而且所产生的 EMI 应不得影响同一电磁环境中其他电子设备的正常工作。显然，EMC 要比单纯讲的抗干扰能力的意义更为深远。

EMC 技术涉及的范围很宽，包括工程学、自然科学、医学、经济学、社会学等多方面的基础科学理论，且其理论体系也有一定的特殊性。EMC 技术又称环境电磁学，在开始的时候环境电磁学考虑的仅是无线电广播带来的射频干扰。但当今电子产品的数量越来越多，各种电子设备的发射功率越来越大，电子设备及系统的灵敏度越来越高，并且接收微弱信号的能力越来越强，同时电子产品的频带也越来越宽，尺寸越来越小，相互影响越来越大。因此，EMI 不再局限于辐射，还要考虑感应、耦合和传导等引起的 EMI，如电磁辐射对生物

的危害、静电、雷电等都属于 EMC 的范畴。

环境电磁学的历史,可上溯至 19 世纪,最早出现的电干扰现象是单线电报间的串扰。希维赛德于 1881 年写了一篇“论干扰”的文章可算是最重要的早期文献。但这类干扰现象在当时并未引起干扰者和被干扰者的重视,随着传输技术的发展,在一根通信线与不对称的强电线之间有了较长的平等运行,干扰问题日益严重,为此在 1887 年,柏林电气协会成立了通信干扰问题委员会。1889 年,英国邮电部门开始研究通信干扰问题,美国《电世界》杂志也登载电磁感应方面的文章。20 世纪初期,索末菲在干扰与抗干扰领域进行了卓越的研究,之后人们对电磁感应影响的研究日益深入,直至目前,此类干扰问题仍是国际电信联盟 (ITU) 第五研究组和第六研究组在各研究期的主要研究课题。

从地球表面到人造卫星活动的近万米空间内处处存在着电磁波,电和磁无时无刻不在影响着人们的生活及生产,电磁能的广泛应用,使工业技术的发展日新月异。电磁能在为人类创造巨大财富的同时,也带来一定的危害,被称为电磁污染。研究电磁污染是环境保护中的重要分支。以往人们把无线电通信装置受到的干扰称为 EMI,表明装置受到外部干扰侵入的危害,其实它本身也对外部其他装置造成危害,称为干扰源。因此,必须同时研究装置的干扰和被干扰,对装置内部的单元和装置之间要注意其相容性。随着科学技术的发展,日益广泛采用的微电子技术和电气化的逐步实现,形成了复杂的电磁环境。不断研究和解决电磁环境中设备之间及系统间相互关系的问题,促进了电磁兼容技术的迅速发展。

电磁污染的来源包括雷电(包括核爆等强电磁脉冲)、静电及所有电气的动作(包括正常与非正常的)过程。凡有电磁现象存在的地方都有 EMC 问题,绝缘物体的相对摩擦也会产生静电效应,由于静电积聚的隐蔽性和释放过程的突发性,造成的危害程度不亚于谐波和强电磁脉冲。

2. 电磁兼容的主要内容

电磁兼容是研究 EMI 的学科,EMC 内含了抗干扰(设备和系统抵抗 EMI 的能力)和电磁辐射控制(设备和系统辐射的电磁能量的控制)两方面。这要从分析形成 EMI 后果的基本要素出发,由 EMI 源辐射的电磁能量,经过耦合途径传输到敏感设备,这个过程称为 EMI 效应。

电磁兼容学是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;也是一门研究在有限的空间、时间和频率资源条件下,各种电工、电子设备或系统在同一电磁环境中可以相互兼容,而不致引起其性能降低的应用科学技术。EMC 的主要内容包括以下几个方面。

① 电磁环境评价。研究系统中各种敏感的设备耐受 EMI 的能力,一般是采用试验来模拟运行中可能出现的干扰,并在设备尽可能接近工作条件下,试验被试设备是否会产生误动或永久性损坏。设备的抗扰性决定于该设备的工作原理、电子线路布置、工作信号电平,以及所采取的抗干扰措施。随着系统中各种自动化系统和通信系统的广泛采用及设备集成为一体化的发展趋向,如何评价这些设备耐受干扰的能力,研究实用和有效的试验方法,制定评价标准,将成为电磁兼容技术的重要课题。一般通过实测或数字仿真等手段,对设备在运行时可能受到的 EMI 水平(幅值、频率、波形等)进行评估。例如,利用可移动的电磁兼容测试车对高压输电线路或变电站产生的各种干扰进行实测,或通过电磁暂态计算程序对可能产生的瞬变电磁场进行数字仿真。电磁环境评价是电磁兼容技术的重要组成部分,是抗干扰设计的基础。

② EMI 耦合途径, 即搞清干扰源产生的 EMI 通过何种路径到达被干扰的对象。EMI 的范围是相当大的, 从探测不到的微弱干扰到高强度干扰, 一般来说, 干扰可分为传导型干扰和辐射型干扰两大类。传导干扰是指干扰源通过电源线路、接地线和信号线传播到达对象所造成的干扰, 如通过电源线侵入的雷电冲击源产生的干扰。辐射干扰是指通过电磁源空间辐射到达敏感设备的干扰。例如, 输电线路电晕产生的无线电干扰或电视干扰。研究干扰的耦合途径, 对制定抗干扰的措施、消除或抑制干扰有重要的意义。

③ 抗干扰技术。EMI 的产生和耦合, 使敏感设备不可能完全避免电磁干扰。因此, 比较经济合理的解决办法是在敏感设备上应用抗干扰技术。研究有效、经济和适用的抗干扰技术也是未来电磁兼容领域的重要任务。

④ 电能质量控制。国际大电网会议 36 学术委员会(电力系统电磁兼容)把电能质量控制也列入电磁兼容的范畴, 研究的内容为频率变化、谐波、电压闪变、电压骤降等对用电设备性能的影响。

⑤ 电磁场生态影响。公众对工频电磁场对人体健康可能产生有害影响的疑虑, 已成为一些国家高压输电发展的重要制约因素。致游离辐射, 非致游离辐射, 包括低频电磁场是否对生物系统, 特别是对人类的健康产生有害影响, 始终是一个悬而未决的问题。尽管全球的科学家对此进行了大量的研究, 但由于此问题极其复杂, 因此至今尚难以得出结论。预测未来需要开展更多的研究课题。

3. 电磁兼容学研究的热点

电磁兼容技术研究有两个特点: 一是涉及范围较广, 包括自然界中的各种 EMI, 以及各种电气、电子设备的设计、安装和各系统之间的 EMI 等; 二是技术难度大, 因为干扰源日益增多, 传播的途径也是多种多样的, 在军工、电力、通信、交通和工矿企业普遍存在 EMI 问题。EMI 对系统和设备是非常有害的, 在电力系统供电网络中, 用户的大功率电弧炉产生的冲击负荷, 倘若在设计中没有考虑电磁兼容问题, 将有可能给电网造成很大冲击, 会增大电网电磁场对电力系统设备和用电设备的潜在危害。

研究电磁兼容的目的是为了保证设备或系统在电磁环境中能够具有正常工作的能力, 以及研究电磁波对社会生产活动和人体健康造成危害的机理及其预防措施。电磁兼容学是一门新兴的、跨学科的综合应用学科, 其核心仍然是电磁波, 其理论基础包括数学、电磁场理论、电路理论、微波理论与技术、天线与电波传播理论、通信理论、材料科学、计算机与控制理论、机械工艺学、核物理学、生物医学, 以及法律学、社会学等内容。电磁兼容学也是一门综合性的边缘学科, 作为边缘技术, 它以电气和无线电技术的基本理论为基础, 并涉及许多新的技术领域, 如微波技术、微电子技术、计算机技术、通信和网络技术、新材料等。电磁兼容技术研究的范围很广, 几乎所有现代化工业领域, 如电力、通信、交通、航天、军工、计算机和医疗等, 都必须解决电磁兼容问题。现在, 电磁兼容学已成为国内外瞩目的迅速发展的学科, 预计在 21 世纪, 它还将获得更加迅速的发展。电磁兼容学又是技术与管理并重的实用工程学。开展这样的工程, 需要投入大量的人力和财力。电磁兼容技术涉及的频率范围宽达 $0 \sim 400$ GHz, 研究对象除了传统设施外, 涉及范围从芯片级直到各种舰船、航天飞机、洲际导弹, 甚至整个地球的电磁环境。电磁兼容学研究的热点内容主要有:

① EMI 源的特性及其传输特性;

② EMI 的危害效应;

- ③ EMI 的抑制技术;
- ④ 电磁频谱的利用和管理;
- ⑤ EMC 标准与规范;
- ⑥ EMC 的测量与试验技术;
- ⑦ 电磁泄漏与静电放电等。

国际标准化组织已经制定了 EMC 的有关标准和规范,我国在这方面的起步虽然较晚,但发展很快。随着市场经济的发展,我国要参与世界技术市场的竞争,进出口的电子产品都必须通过 EMC 检验。因此,我国政府和相关部门越来越关注 EMC 问题,不断制定了相关的强制性贯彻标准。各部门和军兵种也都开始研究并建立不同规模的 EMC 实验室与检测中心,促进 EMC 技术的普及、推广和应用。我国 1998 年已立法强制对 6 类进口电子产品(计算机、显示器、打印机、单片开关电源、电视机和音响)及通信终端产品施行 EMC 检测。1999 年国家质量监督局发布了《EMC 认证管理办法》。我国电子技术标准化研究所的 EMC 测试实验室,已被美国联邦通信委员会的 FCC 认可,从 2000 年 2 月 16 日起,由该实验室出具的出口美国的信息技术设备及发射和接收设备的数据将被美国直接接受。产品的 EMC 检测是实现电磁兼容不可缺少的技术手段,强制贯彻电磁兼容标准,则是保证产品质量和提高市场竞争力的先决条件。

EMC 的工程设计方法有测试修改法,即在设计的过程中尽量采用电磁兼容设计规范,样机完成后进行测试,若发现不能满足 EMC 要求,再进行修改,直到满足要求为止,该方法适合比较简单的设备,但开发成本较高。而 EMC 的系统设计法,是在产品的设计过程中仔细预测各种可能发生的电磁兼容问题,从设计的一开始就采取各种措施避免电磁兼容问题,这种方法通常能在正式产品完成之前解决 80% 的电磁兼容问题。

为提高 EMC,各国开展了大量的试验研究和实测工作,并且开发了一系列的计算机计算程序,如天线-天线兼容性分析程序(ATACAP),机箱-机箱兼容性分析程序(BTB-CAP),场-线兼容性分析程序(FTWCAP),美国 Signatron 公司编制的可以确定电子线路的非线性传输函数的非线性电路分析程序(SIGNCAP)等。由美国空军研制的系统内部分析程序(IAP)是一种大规模的 EMC 分析程序,它可以有 100 个或更多的源、接受器和通道的组合。采用 IAP 可提供:系统 EMC 薄弱环节;改编规范的极限值;提出的试验性产品,要在不符合规范要求并不降低整个系统性能的基础上请求弃权分析;对设计折中方案的兼容性分析;在对系统进行详细计算之前,预计 EMC 控制的效果。IAP 包括以下两部分:

① 系统内部 EMC 分析程序(IEMCAP);

② 对于雷电、静电、电磁器件、非线性接收机效应和电磁场分析的补充模型,至于电力系统暂态过程对通信、信号设备的干扰,以及雷电对通信、信号设备的干扰,则广泛采用电磁暂态程序(EMTP)。这些程序的广泛应用,大大提高了信息系统及其设备的 EMC,并且改进了电力系统及相邻通信、信号系统的 EMC 及工程质量。

4. 电磁兼容学的发展

电磁兼容是从过去的 EMI 发展起来的,这项研究可上溯到 19 世纪。20 世纪 40 年代,为了解决飞机通信系统受到 EMI 造成飞机事故的问题,科学家们开始较为系统地进行电磁兼容技术的研究。1822 年安培提出了一切磁现象的根源是电流的假说,1831 年法拉第发现变化的磁场在导线中产生感应电动势的规律,1864 年麦克斯韦全面论述了电和磁的相互作用

用,提出了位移电流的理论,总结出麦克斯韦方程,预言电磁波的存在,麦克斯韦的电磁场理论是研究电磁兼容的理论基础。1881年英国科学家希维赛德发表了“论干扰”的文章,标志着EMC研究的开端。1888年德国科学家赫兹首创了天线,第一次把电磁波辐射到自由空间,同时又成功地接收到电磁波,从此开始了EMC的实验研究。

1889年英国邮电部门研究了通信中的干扰问题,使EMC研究开始走向工程化。1944年德国电气工程师协会制定了世界上第一个EMC规范VDE0878,1945年美国颁布了第一个EMC军用规范JAN-I-225。我国从1983年开始也陆续颁布了一系列有关EMC的规范。

虽然EMI问题由来已久,但电磁兼容这个新兴的综合性学科却是近代形成的。其主要研究和应用的内容包括:EMC标准和规范;分析和预测;设计;实验测量;开发屏蔽材料;培训教育和管理等。除了感性、容性及阻性等耦合方式引起的干扰外,人们还对辐射性干扰进行了大量研究。虽然在早期这些工作进行得还比较零散,但以后逐步走向系统化,各国陆续建立起相关的科研机构。前苏联在1984年就已制定了《工业无线电干扰的极限容许值标准》并颁布施行(1954年曾进行了一次修改)。其他国家也相继加强了EMI的研究工作。目前,国际上除了EMC专业学会外,还有国际无线电干扰特别委员会(CISPR)等组织从事与EMC有关的高频干扰课题的研究。

美国自1945年开始,颁布了一系列电磁兼容方面的军用标准和设计规范,并不断加以充实和完善,使电磁兼容技术进入新的阶段。20世纪60年代以来,现代科学技术向高频、高速、高灵敏度、高集成化、高可靠性、高安装密度方向发展,尤其是信息网络和高速计算机技术已经越来越多地成为人类社会生产和生活的主导技术,这都使得EMC获得了空前跃进的大好时机。同时也由于航空工业、航天工业、造船工业及其他国防军事工业的需要,使得EMC获得空前的大发展。EMC还将在信息安全和生物电磁学等方面获得较大的进展。

EMI是人们早就发现的电磁现象,它几乎和电磁效应的现象同时被发现,1881年英国科学家发表“论干扰”的文章,标志着研究干扰问题的开始。

20世纪40年代提出EMC概念,是EMI问题由单纯的排除干扰逐步发展成为从理论上、技术上全面控制用电设备在其电磁环境中正常工作能力保证的系统工程。20世纪70年代以来,电磁兼容技术逐渐成为非常活跃的学科领域之一。20世纪80年代,美国、德国、日本、前苏联、法国等经济发达国家在电磁兼容研究和应用方面达到很高的水平,建立了相应的电磁兼容标准和规范,电磁兼容设计成为民用电子设备和军用武器装备研制中必须严格遵循的原则和步骤。EMC成为产品可靠性保证中的重要组成部分。20世纪90年代,EMC工程以事后检测处理发展到预先分析评估、预先检验、预先设计。

我国开展EMC工作较晚,陆续颁布了一些EMC设计要求、测试方法等国家标准和国家军用标准,但具体的设计规范仍很缺乏。电磁兼容工作渗透到每一个电气、电子系统及设备中,只有通过总体设计部门管理协调,才能解决EMC问题。

电磁兼容是一个正在发展的领域,这是由于现代的计算、通信、控制系统中,电气和电子线路的密度及它们之间的相关功能日益增加。在许多复杂系统中,由于性能要求的扩展,往往需要更高速度的电路和更宽的频带。频谱使用的日益扩展(包括幅度和频率两者),以及在各个频段上使用频率的日益密集,对EMI的数量和严重程度产生了重大影响。一个系统中,只要把两个以上很小的元件放在同一环境中,就会产生EMI,而且,每加入一个新的元件,都会使EMI的可能性进一步增加。甚至看来很小的干扰都可能引起严重的故障或降低稳定性。

随着输电电压等级的提高（达 1 000~1 500 kV 的特高压输电），电力系统短路电流的进一步增大（高达 80~100 kA），电力电子设备的广泛应用，干扰源变得更为强大；核电磁脉冲的出现，又增加了新的干扰源，使电磁兼容问题显得更为重要。与此同时，微电子学的进步及微电子元件的广泛应用，使干扰的接收器变得更为脆弱和敏感。机电一体化设备的日益广泛应用，也使得电磁兼容问题变得更为突出，这些都给 EMC 带来了新的课题。

1.1.2 电磁兼容技术面临的挑战

1. 电子产品的发展与应用

随着信息技术、自动化控制技术、通信导航技术和图像、语音、移动电话、计算机等电子设备的广泛应用，电磁兼容成为世界工业技术的热点问题。电子产品在方便人们的同时，对社会生产活动和人体健康也带来了一系列的不利影响。一方面，电子元件几乎在所有的设备中都存在，而它们越来越趋于在极微弱的信号下工作，且信号工作频率越来越高，动作时间越来越短。因而更容易受到外界 EMI 或产生 EMI；另一方面，高能量、高频率的发射源的增多，也意味着干扰信号的增强。同时，电磁辐射污染已被世界卫生组织列为必须严加控制的现代公害之一，据调查，长期接受高频电磁辐射，会对眼睛、神经系统、生殖系统、心血管系统、消化系统及骨组织造成严重的不良影响，甚至危及生命。因此，清洁电磁环境，保证电子产品正常工作已受到世界范围的普遍关注。

由于环境中存在各种形式的 EMI 源，EMI 现象经常发生。如果在一个系统中各种用电设备能和谐正常工作而不致相互发生 EMI 造成性能改变和遭受损坏，人们就满意地称这个系统中的用电设备是相互兼容的。但是随着用电设备功能的多样化、结构的复杂化、功率的加大和频率的提高，它们的灵敏度已越来越高，这种相互包容兼顾、各显其能的状态很难获得。为了使系统达到电磁兼容，必须以系统的电磁环境为依据，要求每个用电设备不产生超过一定限度的电磁辐射，同时又要求它具有一定的抗干扰能力。只有对每个设备做这两方面的约束，才能保证系统达到完全兼容。

EMI 不仅影响电子设备的正常工作，甚至造成电子设备中某些元器件的损坏。因此，对电子设备的电磁兼容技术要给予充分的重视，既要注意使电子设备不受周围 EMI 的影响而能正常工作，又要注意电子设备本身不对周围其他设备产生 EMI，影响其他设备正常运行。这里内涵着电子设备在工作中产生的电磁辐射要限制在一定水平内；另外，它本身要有一定的抗干扰能力，这便是设备研制中所必须解决的兼容问题。EMC 是反映电子系统性能的重要指标之一，系统能电磁兼容意味着无论是在系统内部，还是对其所处的环境，系统都能如预期那样工作。

汽车工业的发展也加剧了电磁环境的变化，由于汽车工作时 EMI 相当突出，严重时会造成损坏电子元器件。因此，汽车电子设备的电磁环境最为恶劣，汽车电子设备的 EMC 问题也特别受到人们的重视。为了解决电子设备在汽车上应用的电磁兼容问题，根据规范要求和实际需要，应采用干扰抑制技术抑制通过电源线、信号线和地线进入电路的传导干扰，同时阻止因公共阻抗、长线传输而引起的系统间干扰；并通过优化元器件的选择和合理安排电路系统，使干扰的影响减小。

计算机软件抗干扰技术的发展和运用，稳定了内存数据并保证程序指针。计算机软件可以支持和加强硬件的抗干扰能力。如果计算机系统中随机内存 RAM 主要用于测量和控制时数据的暂时存放，内存空间较小，对存放的数据而言，若将采集到的几组数据求平均值作为

采样结果,可避免在采集时因干扰而破坏了数据的真实性;如果存放在随机内存中的数据因干扰而丢失或发生变化,可以在随机内存区设置检验标志;为了减少干扰对随机内存区的破坏,可在随机存储器芯片的写信号线上加触发装置,只有在CPU写数据时才触发。软件抗干扰的措施很多,如数字滤波程序、抗窄脉冲的延时程序、逻辑状态的真伪判别等。有时候,必须采用软件和硬件相结合的方法才能抑制干扰,从而保护程序正常运行。

近年来,电子设备向着轻、薄、短、小和多功能、高性能及低成本方向发展,塑料机箱、塑料部件或面板广泛地应用于电子设备上,于是外界电磁波很容易穿透外壳或面板,对电子设备的正常工作产生有害的干扰;而电子设备所产生的电磁波,也非常容易辐射到周围空间,影响其他电子设备的正常工作。为了使电子设备能满足 EMC 的要求,在实践中,研究出塑料金属化处理的工艺方法,如溅射镀锌、真空镀(AI)、电镀或化学镀铜、粘贴金属箔(Cu或Al)和涂敷导电涂料等。经过金属化处理之后,使完全绝缘的塑料表面或塑料本身(导电塑料)具有金属那样反射、吸收、传导和衰减电磁波的特性,从而起到屏蔽电磁波干扰的作用。实际应用中,采用导电涂料做屏蔽涂层,性能优良而且价格适宜。在需要屏蔽的地方,做成一个封闭的导电壳体并接地,把内、外两种不同的电磁波隔离开。实践表明,若屏蔽材料能达到30~40 dB以上衰减量的屏蔽效果时,就是实用、可行的。

由于电子技术应用广泛,而且各种干扰设备的辐射很复杂,因此,要完全消除EMI是不可能的。但是,根据EMC原理,可以采取许多技术措施减小EMI,将EMI控制到一定范围内,从而保证系统或设备的兼容性。保证设备的EMC是一项复杂的技术任务,对于这个问题不存在万能的解决方法。电磁兼容技术涉及面很广,EMC领域也正在发展,重要的是掌握有关电磁兼容的基本原理,认真分析和试验,就能选择合适的解决问题的方法。

近年来,EMC已由事后处理发展到预先分析、预测和设计。电磁兼容已成为现代工程设计中的重要组成部分。EMC达标认证已由一个国家范围向全球地区发展,使EMC与安全性、环境适应性处于同等重要地位。

2. EMI的日益严重

电磁环境(Electromagnetic Environment)是指传输媒质,泛指不同种类的传输线、缆和空间传输媒质。电磁场或电信号包括各种类型的电信号、电磁波,频率从接近直流的低频到微波、毫米波、亚毫米波;信号的形式各种各样,有脉冲式的,也有连续波,有的还被各种调制方式所调制。这些电磁波和电信号是由成千上万甚至几百万的信号源所产生的。辐射源的类型多,而且复杂多变,信号密度可以超过每秒百万脉冲。这些电磁信号,可以对人类的身体直接产生影响,产生所谓的电磁波生物效应;也可以对各种电气、电子设备的工作产生影响,使其工作性能降低,甚至破坏其正常工作。

EMI必须包含三个要素,即EMI源、EMI传递途径(传导、辐射、耦合)、接收EMI的响应者。这三个要素相当复杂,不同的场合有不同的表现,总的来说,根据电磁感应、趋肤效应、电磁振荡与电磁波传播等基本物理规律可知,电磁物理量随时间变化越快,越容易感生EMI;频率越高越容易产生辐射;电磁场强度与距离平方成反比;一些灵敏度高的未屏蔽电路容易产生耦合等。在此基础上,分析EMI日益严重的原因可归纳如下。

① 高频高功率化。近年来,电子产品的发展趋势是高频化,如计算机的时钟频率已从30 MHz提高到100 MHz以上;移动通信从单频道(900 MHz)发展成双频道(900 MHz、2 000 MHz);电视、广播从米波发展到分米波。电子产品的信号频率越高,越容易产生辐

射和耦合,而在产品设计中越难抑制其产生的干扰,致使 EMI 加剧。雷达、广播、通信等发射机、差转台、基站为了增大作用距离和提高性能,其发射功率与日俱增,对电磁环境的污染也越来越严重。

② 高速数字化。目前许多电子产品都采用数字电路,而数字电路是常见的 EMI 源,同时数字电路的抗 EMI 能力较弱,在 EMI 下有时会产生误动作。近年来,数字电路正朝着高速化的方向发展,数字逻辑电路的频率达到 50 MHz 以上;脉冲信号的上升/下降时间不超过信号周期的 5%,这样陡的快速跳变信号包含了更多的频率更高的高次谐波分量,而更容易产生 EMI。

③ 高密度组装。高密度组装方式大大提高了电子元器件、IC、机电部件的堆积密度,密集的组装,使电子元器件间的距离大大缩小,引脚间距和布线间距已缩小到 0.2 mm,大大加剧了相互间的耦合,因而增加了抗 EMI 的难度。

④ 低电压化。IC 及半导体有源器件向低电压方向发展,电压降低之后,IC 及半导体有源器件对瞬变电压、浪涌电压、静电放电等 EMI 的抵抗能力明显下降,设计中还需要对 IC、CMOS、MOSFET 等器件采用抗 EMI 元件加以保护,因而对电磁环境和产品设计提出了更高的要求。例如,大规模集成电路芯片较低的供电电压降低了内部噪声门限,而它们精细的几何尺寸使自身在较低的电平下易受到电弧损坏。它们更快的同步操作能产生更尖的电流感冲,这会带来从 I/O 端口产生宽带发射的问题。一般来说,高速数字电路比传统的模拟电路会产生更多的干扰。

⑤ 频点密度提高,频带加宽。随着信息化的深入和广泛的发展,使用的电磁波频率点越来越密,频带越来越宽,相互之间容易出现干扰现象。当今,在空间传播的电磁波的频点之密、频谱之宽、空域之广、能量之高均是前所未有的,大大恶化了电磁环境。

⑥ 移动化趋势。设备的小型化使源与敏感器靠得很近,这使传播路径缩短,增加了干扰的机会。同时器件的小型化增加了它们对干扰的敏感度。由于设备越来越小并且便于携带,像汽车电话、膝上计算机等设备随处可用,而不一定局限于办公室那样的受控环境,这也带来了兼容性问题。例如,许多汽车装有的电子控制系统中采用了大量的电子器件,如果汽车电话与这个控制系统不兼容,就会引起误动作。现在通信、计算机、音像乃至网络均已移动化,而且数量庞大。庞大的移动化设备的应用,使 EMI 源(各种移动电子产品)可以在任何时间、任何地点出现,大大加剧了 EMI 的机会,恶化了电磁环境。

传统上,电子线路装在金属盒内,这种金属盒能够通过切断电磁能量的传播路径来提供屏蔽作用。现在,为了减轻重量、降低成本,越来越多地采用塑料机箱。塑料机箱对于 EMI 是透明的,因此敏感器件处于无保护的状态。

1.2 电磁干扰及其传播途径

1.2.1 电磁干扰源与电磁干扰

1. 电磁骚扰

电磁骚扰是指任何可能引起装置、设备或系统性能下降,或者对有生命或无生命物产生

损害作用的电磁现象。电磁骚扰是客观存在的一种物理现象,其产生原因可能是外界因素,也可能是自身的变化。电磁骚扰可能是电磁噪声、无用信号或传播媒介自身的变化。它可引起设备、系统降级或损害,但不一定会形成后果。而EMI则是由电磁骚扰引起的后果,造成EMI的后果须有三个条件:骚扰源、导致干扰传播的途径及受害设备自身。因此要想达到设备的电磁兼容,需要消除骚扰源或削弱它的强度;破坏干扰传播的途径或减少干扰耦合度;精心设计受害设备的选择性或提高其抗干扰能力。

从干扰源把电磁能量传到受干扰对象有两种方式:传导方式和辐射方式。从接收器的角度看,耦合可分为两类:传导耦合和辐射耦合。传导耦合又分为直接传导耦合、公共阻抗耦合和转移阻抗耦合,辐射耦合又分为场(天线)对天线耦合、场对电缆耦合和电缆对电缆的耦合。电磁骚扰传播途径示意图如图1-1所示。在实际情况下,传导耦合和辐射耦合并不是截然不同的,它们可以相互转化。例如,在金属导线中传输的电流很大时,

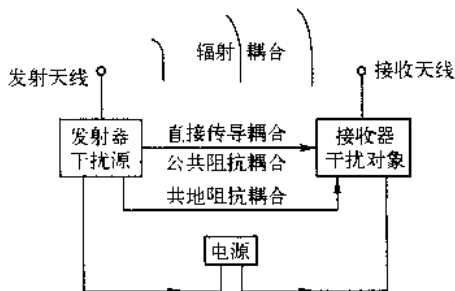


图 1-1 电磁骚扰传播途径示意图

辐射也会很严重。电磁辐射一词的含义有时也可引申,将电磁感应现象也包含在内。RFI/EMI可以通过任何一种设备机壳的开口、通风孔、出入口、电缆、测量孔、门框、舱盖、抽屉和面板,以及机壳的非理想连接面等进行辐射。RFI/EMI也可由进入敏感设备的导线和电缆进行辐射,任何一个良好的电磁能量辐射器也可以作为良好的接收器。电磁骚扰根据其来源,可分为自然骚扰和人为骚扰两大类。典型的自然骚扰源有:

- ① 雷击电磁脉冲 LEMP, 又称大气噪声;
- ② 太阳噪声, 太阳黑子活动时产生的磁暴;
- ③ 宇宙噪声, 来自银河系;
- ④ 静电放电 ESD。

人为骚扰源的类型较多,典型的有:

- ① 电力网络中操作过电压 SEMP;
- ② 核电磁脉冲 NEMP;
- ③ 高压配电系统对地短路造成过电压;

④ 家用电器、高频设备、电力设备、内燃机、无线电发射和接收设备、高速数字电路设备等,通过放电噪声、接触噪声、过渡现象、反射现象、非功能性噪声和无用信号等均会造成EMI。

自然骚扰以其发生源不可控为特点,如电子噪声、天电噪声、地球外噪声、沉积静电等。人为骚扰以其发生源可知并且可控为特点,如高频及微波设备、高压设备、开关设备、火花设备、核电磁脉冲等。电磁骚扰引起设备、传输通道或系统性能的下降,它的主要要素是自然和人为的骚扰源、通过公共地线阻抗(内阻)的耦合、沿电源线传导的电磁骚扰和辐射干扰等。

2. 电磁干扰

EMI是指电磁骚扰引起的设备、传输通道或系统性能的下降。引发EMI的原因可能是另一个设备或系统的有用电磁信号,也可能是某种电磁噪声。一个系统或系统内某一线路受

EMI 程度可以表示为如下关系式:

$$N = G \times C / I \quad (1-1)$$

式中, G 为噪声源强度; C 为噪声通过某种途径传到受干扰处的耦合因素; I 为受干扰电路的敏感程度。

电磁噪声指“一种明显不传送信息的时变电磁现象,它可能与有用信号叠加或组合”。任何形式的自然现象或电能装置所发射的电磁能量,能使共享同一环境的人或其他生物受到伤害,或对其他设备分系统或系统发生电磁危害,导致其性能降级或失效。

在 IEC61312—1 中对 LEMP 定义为:“作为干扰源的闪电电流和闪电电磁场。” GB50057—94 局部修改条文定义为:“作为干扰源的直接雷击和附近雷击所引起的效应。绝大多数是通过连接导体的干扰,如雷电流或部分雷电流,被雷电击中的装置的电位升高及电磁辐射干扰。” LEMP 属于放电而产生的噪声,由于雷云之间或雷云与大地之间产生火花放电,往往伴随着急剧的电流、电压的瞬时变化,即 di/dt 或 du/dt 很大。与 NEMP 相比,LEMP 的电磁场强度、陡度和破坏范围都弱得多,但雷电这一大气物理现象,每次释放的数百兆焦耳 (MJ) 能量与足可影响敏感设备的毫焦耳 (mJ) 能量相比,相差悬殊。1971 年美国通用研究公司 R.D 希尔用仿真试验建立模式证明:雷电干扰对无屏蔽的计算机,当磁感应强度 $B_m = 0.07$ Gs 时,计算机误动作;当 $B_d = 2.4$ Gs 时,计算机设备永久性损坏。

一方面,电子设备或系统总是受外部 EMI 所困扰;另一方面,电子设备本身就是强、弱电不等的骚扰源。骚扰以不同的途径产生,但主要是由于电压、电流的突变引起的。例如,高能量的切换动力电源、短路、大电机启动引起的电压降,电力系统的断路器在分断短路电流时产生的高频电压分量,控制设备切换时产生的浪涌电压,雷电引起瞬时电压聚变而产生的过电压等。表 1-1 给出了电气设备受到的各类电磁干扰现象。

表 1-1 电气设备受到的各类电磁干扰现象

频 率	传 播	耦 合		发 射	抗 扰 度
低频 $0 \leq f < 9$ kHz	传导性	共模 差模		3 的倍数谐波(零序)残余电流 谐波、谐波和换相缺口对电网电能传输的影响	1. 频电压 换相缺口、电压波动、跌落和短时中断、瞬时过电压、相位波动、不平衡电压、频率波动、直流分量
	辐射	近场	磁性耦合	磁场	磁场
			容性耦合	电场	电场
	辐射	远场	电磁场		RF 电磁场
低频 $9 \text{ kHz} \leq f$	传导性	共模		感应的 RF 电压电流	感应的 RF 电压电流单向瞬变
		差模		电场(高阻抗)	感应的 RF 电压电流单向瞬变
	辐射	近场		磁场(低阻抗)	脉冲磁场、便携式发射机
		远场		电磁场	RF 电磁场
大的频谱		CD= 接触放电、AD= 空气放电			

注: 低频和高频之间的界限为 9 kHz

3. EMI 的分类

干扰源的分类方法很多,EMI 可按照发生源、传播路径、辐射干扰的产生原因、不同设备的工作原理、发生的频率、频率范围和不同的交流电源进行分类。从 EMI 属性来分,