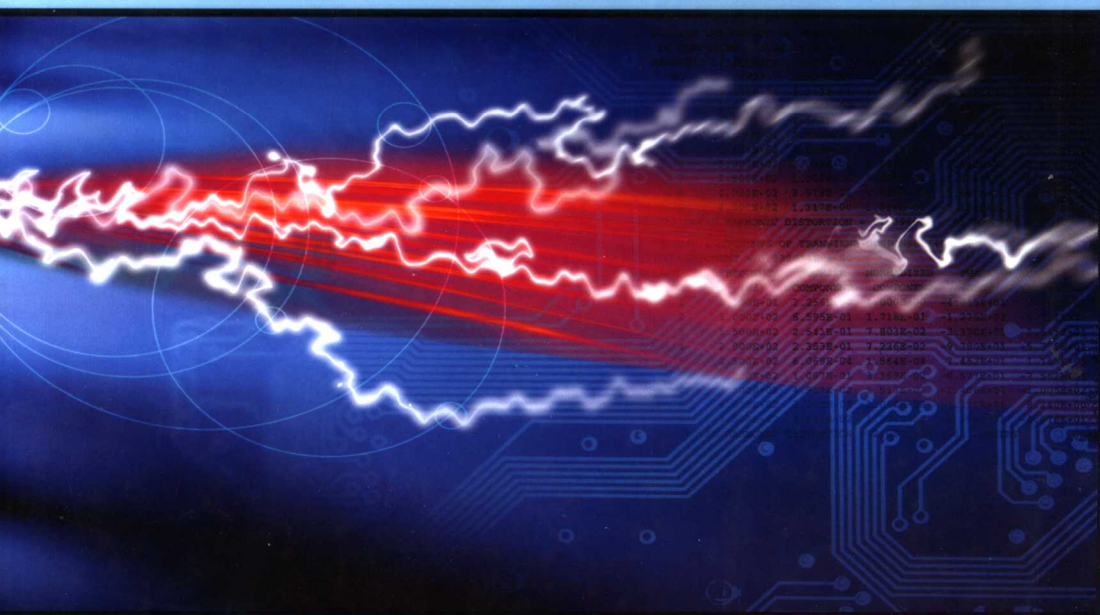


DIAN ZI SHE BEI FANG GAN RAO YUAN LI YU JI SHU

电子设备防干扰 原理与技术



周旭 编著

国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

电子设备防干扰原理与技术

周旭 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书以电子设备的防干扰研究为主线,侧重介绍电子设备防干扰的基本原理及相关技术,对设备和产品可能出现的各种干扰进行分析,包括其产生原因、传播方式以及分类方法等,并提出控制干扰的策略和各项措施;介绍防干扰试验的场地、测量设备、测量仪器、测量方法以及部分标准和规范;最后分别以印制电路板、电子信息设备和机床数控系统为例,进行了详细阐述。

本书内容新颖、实用,既可以作为大、中专学校电子工程、电气工程、无线电和通信工程、仪器和测试等专业的教材,也适合于广大电气、电子、机械类的设计、生产、管理人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子设备防干扰原理与技术/周旭编著. —北京:国防工业出版社, 2005. 1

ISBN 7-118-03726-5

I. 电... II. 周... III. 电子设备—抗干扰
IV. TN05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 142206 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

涿中印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 23½ 589 千字

2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—4000 册 定价:36.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

在人类尚未认识和使用电能之前,地球上就存在着电磁现象。随着人类文明和科学技术的不断发展,当今世界,各种电子设备或系统已获得了广泛的应用。一方面,这些电子设备和系统在工业、农业等国民经济的各个部门以及国防建设中发挥着重要作用,同时给人们的日常生活带来了极大的方便;另一方面,这些设备和系统在正常运行时也往往产生一些有用的或无用的电磁能量,这些电磁能量可能对其周围的其他电子设备或系统产生不良影响,甚至造成严重的危害,从而形成了电磁干扰。诸如无线电广播电台、电视台、通信发射机、雷达和导航设备等各种装置,在它们正常运行期间须发射电磁能,这些装置是有意把电磁能辐射到环境中;与此相反,诸如日常生活中使用的汽车点火系统、工业控制设备等也辐射电磁能,这些辐射是无意辐射。这些有意、无意辐射源产生的电磁能量,会干扰许多其他电子设备和系统的正常运行。实践证明,电子设备或系统越是现代化,其所造成的电磁环境就越复杂;反之,复杂的电磁环境又对电子设备和系统提出更为苛刻的要求。因此,人们面临着一个新问题,这就是如何提高现代电子设备和系统在复杂的电磁环境中的生存能力,以确保电子设备或系统达到初始的设计目的。换言之,如何使新设计的电子设备既能防止被干扰,又能防止其产生干扰,是迫使我们不得不加以正视和关注的问题。面对电子产业对电子设备抗干扰知识的新需求,编者根据电子设备自身技术的发展趋势和高校目前宽口径专业设置的现状,并结合多年教学实践的经验,在保持原有讲义学科覆盖面宽特色的基础上,调整、归并部分内容,加深理论基础,加强工程意识,反映科技发展新动向,以适应高校教学改革向加强基础、淡化专业的通才培养方向的转变,将原有讲义精心打造成本教材。

目前,防干扰问题已经形成一门新的学科。电子设备防干扰的中心课题是研究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,不会引起设备或系统任何部分工作性能的恶化或降低。一个理想的电子设备或系统应该既不辐射任何不希望的能量,又不受任何其他辐射的干扰。

防干扰设计是一门尖端的综合性学科,包含着相当广泛的技术内容。它是多门基础学科的综合应用;是环境电磁学、电子和电气工程、无线电和通信工程、信息和计算机技术、仪器和测试技术、工业自动化技术、机电一体化技术以及系统可靠性工程等专业人员的必备知识。本教材既适用于工科各专业的课堂教学,也适于企业的设计、生产、管理人员自学和参考。

编著本书时,引用了一些前人的成果,在此表示衷心感谢。同时由于编著者水平有限,疏漏、欠妥之处在所难免,竭诚欢迎广大读者批评指正。

周旭 于南通大学

2004.10.2

目 录

第1章 绪论	1	3.1.2 按频率范围分类	28
1.1 电子设备防干扰的发展历程	1	3.1.3 按产生原因分类	29
1.1.1 世界范围内的发展历程	1	3.1.4 按传输状态分类	30
1.1.2 国内的发展概况	4	3.1.5 按是否有人为因素分类	30
1.2 电子设备防干扰的意义和特点	5	3.2 自然电磁干扰源	31
1.2.1 电子设备防干扰的重要性	5	3.2.1 宇宙噪声	31
1.2.2 电子设备防干扰的学科特点	6	3.2.2 大气噪声	31
1.3 电子设备防干扰的研究内容	7	3.2.3 热噪声	32
1.3.1 电磁干扰特性及其传播耦合理论	7	3.3 人为电磁干扰源	32
1.3.2 电磁危害及电磁频谱的利用和管理	8	3.3.1 无线电发射设备	32
1.3.3 电磁耦合的工程分析和防干扰控制技术	8	3.3.2 工业、科学和医用射频设备	33
1.3.4 防干扰设计理论和方法	8	3.3.3 电力、交通、工业设施	33
1.3.5 防干扰测量和试验技术	8	3.3.4 家用电器、电动工具与照明器具	34
1.3.6 防干扰预测和分析	9	3.3.5 信息技术设备	34
1.3.7 防干扰标准、规范与工程管理	9	3.3.6 核电磁脉冲	35
1.3.8 信息设备电磁泄漏及其防护	9	3.4 系统于扰源分析举例	35
1.3.9 环境电磁脉冲及其防护	9	3.5 各种干扰源的产生机理	37
习题	10	3.5.1 静电噪声	37
第2章 电磁场基础	11	3.5.2 放电噪声	40
2.1 宇宙电磁环境	11	3.5.3 接触噪声	44
2.2 地球磁场	13	3.5.4 反射干扰	45
2.3 地球电场	15	3.5.5 过渡干扰	45
2.4 电磁发射基础	16	3.5.6 无用信号	46
2.4.1 电偶极子的辐射场	16	3.6 电磁干扰源的性质	46
2.4.2 磁偶极子的辐射场	18	3.6.1 频谱宽度	46
2.4.3 两类源在远近场的特性比较	18	3.6.2 波形	47
2.4.4 天线	20	3.6.3 幅度或电平	47
2.4.5 传输线基础	23	3.6.4 出现率	47
2.4.6 波导	25	3.6.5 辐射干扰的极化特性	47
习题	27	3.6.6 辐射干扰的方向特性	47
第3章 电磁干扰源	28	3.6.7 天线有效面积	48
3.1 电磁干扰源的分类	28	习题	48
3.1.1 按存在区域分类	28	第4章 电磁干扰的传播	49
		4.1 电磁干扰的三要素	49
		4.2 电磁干扰的传播途径	51
		4.2.1 传导干扰	51

4.2.2 辐射干扰	53	5.9.1 高频电路外界噪声及其抑制	96
习题	57	5.9.2 接收机电路的干扰及其控制	97
第5章 电磁干扰控制技术	58	5.9.3 高频电路防干扰装配工艺	99
5.1 电磁干扰控制策略	58	5.10 电子设备防干扰设计	100
5.1.1 空间分离	58	5.10.1 防干扰设计的主要内容	100
5.1.2 时间分隔	58	5.10.2 防干扰设计的实施细则	102
5.1.3 频率划分和管制	59	习题	104
5.1.4 电气隔离	60	第6章 屏蔽的原理和技术	106
5.2 静电干扰控制技术	61	6.1 概述	106
5.2.1 静电防护的特点	61	6.1.1 屏蔽概念	106
5.2.2 静电控制原理	61	6.1.2 屏蔽效果	106
5.2.3 静电敏感器件保护网络	64	6.2 电场屏蔽	107
5.2.4 防静电制品及其使用	65	6.2.1 电屏蔽原理	107
5.2.5 防静电工艺要求	74	6.2.2 电屏蔽设计要点	110
5.3 感应干扰控制技术	77	6.2.3 变压器的电屏蔽	112
5.4 电源干扰控制技术	77	6.2.4 印制导线的屏蔽	113
5.4.1 电源变压器防干扰	77	6.2.5 扁平电缆的屏蔽	114
5.4.2 电源滤波器	79	6.3 磁场屏蔽	114
5.4.3 串联调整式稳压电源的抗干扰 措施	79	6.3.1 低频磁场的屏蔽	114
5.4.4 开关稳压电源抗干扰措施	80	6.3.2 高频磁场的屏蔽	121
5.5 馈线干扰控制技术	82	6.4 电磁场屏蔽	122
5.5.1 隔离	82	6.4.1 屏蔽原理	122
5.5.2 滤波	82	6.4.2 薄膜屏蔽	124
5.5.3 导线屏蔽	83	6.4.3 多层屏蔽	125
5.6 地线干扰控制技术	84	6.4.4 电路屏蔽及其结构	126
5.6.1 用低阻抗馈线减小地线干扰	84	6.4.5 机壳箱体的屏蔽设计	127
5.6.2 阻隔地环流减小地线干扰	84	6.4.6 实际屏蔽体的屏蔽效能及期 望值	138
5.6.3 合理接地减小地线干扰	86	6.4.7 电磁屏蔽设计步骤	139
5.7 模拟电路干扰控制	86	6.5 屏蔽材料的开发和应用	139
5.7.1 模拟电路噪声控制的一般措施	87	6.5.1 导电涂料	139
5.7.2 集成运放电路的噪声控制	88	6.5.2 导电填料	144
5.7.3 微小电压放大电路干扰控制	90	6.5.3 导电粘合剂	145
5.7.4 集成运放电路抗干扰装配工艺	91	6.5.4 导电润滑脂	145
5.8 数字电路干扰控制	92	6.5.5 胶箔和胶带	146
5.8.1 外来干扰的控制	92	6.5.6 导电光学胶片	146
5.8.2 电源干扰的控制	93	6.5.7 电磁密封衬垫	147
5.8.3 瞬态电流干扰的控制	93	6.5.8 磁屏蔽材料	155
5.8.4 串音及其抑制	94	6.5.9 屏蔽织物	156
5.8.5 反射及其抑制	94	习题	160
5.8.6 A/D 转换器的干扰控制	95	第7章 滤波技术及其应用	161
5.8.7 多路转换器的噪声抑制方法	96	7.1 概述	161
5.9 高频电路干扰控制	96	7.1.1 滤波器的种类	161

7.1.2 滤波器的特性参数	162	第9章 搭接理论及其应用	200
7.1.3 滤波电容器	163	9.1 概述	200
7.1.4 滤波电感器	164	9.1.1 搭接的概念	200
7.2 馈通滤波器	165	9.1.2 搭接的分类	201
7.2.1 馈通滤波器的电路	165	9.1.3 搭接质量的测试	201
7.2.2 馈通滤波器的类型	165	9.2 搭接的基本理论	201
7.2.3 馈通滤波器的安装	165	9.2.1 直接搭接的理论	202
7.2.4 滤波阵列板	166	9.2.2 间接搭接的特性	203
7.3 电源滤波器	166	9.2.3 搭接的电化学腐蚀原理	203
7.3.1 电源线上干扰的类型	166	9.3 搭接的加工方法	204
7.3.2 电源滤波器的结构	167	9.3.1 物理加工的方法	204
7.3.3 电源滤波器的选购	169	9.3.2 机械加工的方法	204
7.3.4 电源滤波器的安装	170	9.3.3 化学加工的方法	205
7.4 信号滤波器	172	9.3.4 搭接表面的清理和防腐涂覆	205
7.4.1 概述	172	9.4 搭接的结构设计	205
7.4.2 电缆滤波器	174	9.4.1 搭接设计的一般原则	205
7.4.3 滤波连接器	174	9.4.2 搭接条(片)的形式和选材	205
7.4.4 磁环扼流圈	175	9.4.3 搭接结构设计举例	206
7.4.5 陶瓷滤波器	175	习题	209
7.4.6 晶体滤波器	175	第10章 电子设备防干扰预测	210
7.4.7 表面声波滤波器	175	10.1 概述	210
7.4.8 铁氧体在滤波中的应用	176	10.1.1 引言	210
7.4.9 怎样在线路板上安装信号线滤波器	178	10.1.2 电子设备防干扰预测的作用	211
习题	178	10.1.3 干扰预测分析的基本思想	212
第8章 接地技术及其应用	179	10.1.4 电子设备防干扰预测的分类	213
8.1 概述	179	10.2 电子设备防干扰预测的数学方法	213
8.2 安全接地	180	10.2.1 解析法	213
8.2.1 设置安全地线的意义	180	10.2.2 数值法	213
8.2.2 设置安全地线的方法	182	10.2.3 近似法	216
8.2.3 安全接地的有效性	182	10.3 电子设备防干扰预测的数学模型	217
8.3 信号接地	185	10.3.1 建模方法	218
8.3.1 信号接地的方式	185	10.3.2 干扰源模型	218
8.3.2 电路的接地设计	188	10.3.3 传输耦合模型	219
8.3.3 信号电缆屏蔽层的接地	192	10.3.4 敏感器模型	219
8.3.4 信号电路屏蔽罩的接地	195	10.4 电子设备防干扰预测的分析步骤	220
8.4 大型复杂电子设备的接地	198	10.4.1 系统级预测分析步骤	220
8.5 运动系统的接地	198	10.4.2 设备级预测分析步骤	221
8.5.1 飞机的接地面	198	习题	222
8.5.2 飞机射频接地面	198	第11章 电子设备防干扰标准与认证	223
8.5.3 飞机避雷接地	199		
8.5.4 飞机静电接地	199		
习题	199		

11.1 概述	223	12.4.2 屏蔽室屏蔽效能的测试	268
11.1.1 防干扰标准	223	12.4.3 场均匀性检测方法	270
11.1.2 产品认证	226	12.5 传导干扰测试	270
11.2 我国的防干扰标准	228	12.5.1 测试布置	271
11.2.1 电子设备防干扰国家规范	228	12.5.2 传导干扰测试方法	272
11.2.2 电子设备防干扰标准体系	229	12.6 传导抗扰度测试	274
11.2.3 信息技术设备的防干扰标准	229	12.6.1 概述	274
11.2.4 无线电干扰和抗扰度测量设备 规范	233	12.6.2 传导抗扰度测试方法	275
11.2.5 我国现行的防干扰标准	234	12.7 辐射发射测试	278
11.3 国内的防干扰认证	238	12.7.1 测试布置	278
11.3.1 发展概况	238	12.7.2 辐射干扰测量方法	279
11.3.2 防干扰认证的管理	238	12.8 辐射抗扰度测试	280
11.3.3 防干扰认证的机构	239	12.8.1 概述	280
习题	240	12.8.2 辐射抗扰度测试方法	280
第 12 章 电子设备防干扰试验技术	241	12.9 超短波频段电磁环境测试 方法	281
12.1 概述	241	12.9.1 磁环境测试的定义及分类	281
12.1.1 试验技术的发展	241	12.9.2 测试依据	281
12.1.2 防干扰试验目的	241	12.9.3 测试准备	283
12.1.3 防干扰试验的分类	241	12.9.4 测试步骤	283
12.1.4 测试的一般步骤	242	12.9.5 统计分析	284
12.1.5 电子设备故障诊断步骤	243	习题	285
12.2 测试仪器与设施	243	第 13 章 印制电路板防干扰技术	286
12.2.1 电磁干扰测量仪	243	13.1 印制电路板简介	286
12.2.2 线路阻抗稳定网络	246	13.1.1 印制电路板的分类	286
12.2.3 穿心电容器	246	13.1.2 表面贴装技术对印制板的要求	288
12.2.4 电流探头	246	13.2 印制电路板上的干扰	288
12.2.5 横电磁波室	249	13.2.1 PCB 中带状线、电线、电缆间的 串音	288
12.2.6 吉赫横电磁波传输室	250	13.2.2 数字 PCB 的电磁辐射干扰	289
12.2.7 试验天线	253	13.3 印制电路板防干扰设计	289
12.2.8 专用试验室	257	13.3.1 印制板设计的先决条件	290
12.2.9 试验桌	258	13.3.2 印制板设计的主要内容	290
12.2.10 开阔场地	258	13.3.3 印制板设计的一般步骤	291
12.2.11 测量仪器和被测设备的隔离	259	13.3.4 印制导线的尺寸和图形	293
12.2.12 被测设备的放置	260	13.3.5 定位孔绘制与定位方法	294
12.3 静电测量及试验	260	13.3.6 印制板防干扰设计要点	295
12.3.1 静电测量的目的	260	13.3.7 模拟数字混合线路板的设计	297
12.3.2 静电测量的特点	260	13.3.8 印制板防静电设计	298
12.3.3 静电电压测量	263	13.4 元器件的选择与布局	301
12.3.4 电阻的测量	264	13.4.1 器件的选择	301
12.3.5 静电放电试验	266	13.4.2 元器件布局技术	302
12.4 屏蔽测量	267	13.5 印制板的布线技术	304
12.4.1 概述	267		

13.5.1 印制板与元器件的高频特性	305	14.3 电缆线路防干扰技术	349
13.5.2 印制板上的地线	305	14.3.1 电子控制设备的回路分类	349
13.5.3 保护与分流线路	310	14.3.2 电线选择	350
13.5.4 局部电源和 IC 间的去耦	311	14.3.3 电线敷设	351
13.5.5 布线实施细则	311	习题	352
13.6 印制电路板的对外连接	314	第 15 章 数控系统防干扰设计	353
13.6.1 用导线互连	314	15.1 数控系统防干扰设计的内容	353
13.6.2 印制电路板插座式互连	314	15.1.1 电压中断和电压暂降	353
13.7 多层印制板防干扰技术	315	15.1.2 快速瞬变电磁脉冲群抗扰性	353
13.7.1 多层印制板设计	315	15.1.3 浪涌抗扰性	353
13.7.2 旁路电容与去耦电容的设计	316	15.1.4 静电放电抗扰性	353
13.7.3 时钟电路的防干扰设计	317	15.2 数控系统的接地技术	353
13.7.4 多层印制板的理论研究方法	318	15.2.1 安全接地	353
习题	318	15.2.2 工作接地	356
第 14 章 电子信息设备防干扰技术	319	15.2.3 屏蔽接地	357
14.1 计算机防干扰技术	319	15.3 电网干扰的抑制	359
14.1.1 概述	319	15.3.1 抑制电源线传输电磁干扰	359
14.1.2 计算机中的干扰	320	15.3.2 抑制电源线中的快速瞬变脉冲串干扰	359
14.1.3 计算机防干扰的一般措施	322	15.3.3 抑制电源中的脉冲串、雷击、浪涌干扰	360
14.1.4 计算机电网干扰的抑制	323	15.4 防止数控系统被干扰	362
14.1.5 计算机电路抗干扰措施	326	15.4.1 模拟信号线干扰抑制	362
14.1.6 计算机系统装接设计	328	15.4.2 数字信号线干扰抑制	362
14.1.7 磁盘装置的防干扰	330	15.5 防止数控系统产生干扰	363
14.1.8 软件防干扰的措施	332	15.5.1 屏蔽	363
14.2 移动通信设备防干扰	338	15.5.2 感性负载加吸收电路抑制瞬态噪声	365
14.2.1 概述	338	15.6 综合设计指南	366
14.2.2 移动电话的电磁辐射及防护	340	习题	367
14.2.3 移动通信网干扰的形成及抑制	340	参考文献	368
14.2.4 CDMA 直放站干扰分析	342		
14.2.5 3.5GHz 频段无线接入系统干扰分析	344		

第1章 绪 论

在人类诞生之前，地球上就存在着电磁现象，只是从麦克斯韦建立电磁理论、赫兹发现电磁波的百余年来，电磁能才得到充分的利用。随着电子技术的迅速发展，现代电子设备已广泛地应用于人类生活的各个领域。例如，电子设备在广播、电视、通信、导航、雷达、遥测遥控及计算机等领域得到了迅速的发展，给人类创造了巨大的物质财富，特别是信息、网络技术的爆炸性发展，使世界的对话距离和时间骤然缩短，世界的面貌焕然一新，地球村的梦想已成为现实。并且，这个发展过程仍以日新月异的速度持续着。

然而，各种电子设备在为人类造福的同时，也大大增加了周围环境中的电磁噪声。这些电磁噪声不但对人类健康造成危害，也对电子设备的正常工作造成严重干扰。如何防止和解决电磁噪声干扰，既是一个老问题又是一个新问题，比如电子设备的设计、安装配线方法以及周围设施环境问题等，所涉及的领域十分广泛。通过对电磁干扰产生的来源进行分析，我们可以发现，在一般情况下，噪声本身是完全没有利用价值的，而且是有害的，但实际情形并不总是如此。随着电子设备的不断增加，某些系统产生的有用信号对其他系统来说，却是一个干扰源，而且这种现象近年来正呈现不断增多的趋势。

所谓电磁干扰是指引起电子设备工作失常的各种电磁效应。电磁干扰从甚低频到微波波段，无孔不入地辐射或传导至运行中的电子设备或系统以及周围的环境。人们常说的射频干扰（Radio Frequency Interference，简称 RFI）是指无线电广播范围的干扰。

电子设备不可避免地在电磁环境（EME）中工作，因此，必须解决电子设备在电磁环境中的适应能力。电子设备防干扰是一门关于抗电磁干扰影响的科学，它的中心课题是研究控制和消除电磁干扰。

本章回顾了电子设备防干扰学科的发展历史；介绍了电子设备防干扰学科的研究内容；指出了电子设备防干扰学科的特点；详细地介绍了防干扰基本术语。通过宏观概括，使读者对电子设备防干扰学科有一个清晰、全面的认识。

1.1 电子设备防干扰的发展历程

1.1.1 世界范围内的发展历程

在世界范围内，研究电磁干扰这一传统问题的历史可上溯至 19 世纪。下面我们以时间顺序透视其发展的概况。

1823 年，安培发表了电流产生磁力的基本定律。1831 年，法拉第发现电磁感应现象，总结出电磁感应定律，揭示了变化的磁场在导线中产生感应电动势的规律。1840 年，美国人亨利成功地获得了高频电磁振荡。1864 年，麦克斯韦综合了电磁感应定律和安培全电流定律，总结出麦克斯韦方程，提出了位移电流的理论，全面地论述了电和磁的相互作用并预言电磁

波的存在。麦克斯韦的电磁场理论为认识和研究电磁干扰现象奠定了理论基础。1866年，世界上第一台发电机发电。从此，利用电磁效应工作的电气设备越来越多，同时也产生了越来越多有害的电磁干扰。在不知不觉当中，人类所处的电磁环境产生了巨大的变化，人为产生的电磁能量与日俱增，造成了电磁环境的污染。

1881年，英国科学家希维赛德发表了“论干扰”的文章，标志着研究电子设备防干扰问题的开端。最早发现的电磁干扰现象是单线电报间的串音，但这类干扰现象在当时并未引起重视，随着电气运输的出现，通信线与强电线之间的干扰问题日益严重。于是，在跨越大西洋的几个欧洲国家，涉及无线电干扰各个方面的技术论文开始陆续出现，这些论文不仅研究无线电传输的电磁干扰，而且研究无线电接收的干扰。

1886年10月，德国物理学家赫兹用放电线圈做火花放电实验，偶然发现和放电线圈靠得很近的另一个开口的绝缘线圈中有电火花跳过。赫兹十分敏感，开始有计划地进行这方面的研究。在1年多的时间里，他反复改变导体（天线锥形）的形状、大小、介质的种类、放电线圈与感应线圈之间的距离，终于把电磁波辐射到自由空间，同时又成功地接收到电磁波，用实验证实了电磁波的存在，从此开始了对电磁干扰问题的实验研究。后来，赫兹研究了紫外光对火花放电的影响，发现了光电效应，也就是物质在光的照射下释放出电子的现象。这一发现，成了爱因斯坦建立光量子理论的实验基础。赫兹还通过实验确认电磁波是横波，具有直线传播、反射、折射和偏振等光学性质，并且实现了两列电磁波的干涉，从而全面验证了麦克斯韦的光电磁理论的正确性，进一步完善了麦克斯韦方程组，使它更加优美、对称，得出了麦克斯韦方程组的现代形式。赫兹对人类文明做出了很大贡献，1894年元旦因中毒而去世，年仅36岁。后人为了表彰他的功绩，用他的名字来命名各种波动频率的单位。

1887年，柏林电气协会成立了“全部干扰问题委员会”，成员有赫兹和西门子等。1889年，英国邮电部门研究了通信中的干扰问题，于是，干扰问题开始走向工程化和产业化。

1933年，国际无线电干扰特别委员会（The International Special Committee on Radio Interference, CISPR）成立。CISPR的第一次会议于1934年6月28日至30日在法国巴黎召开。CISPR起初提出的两个重要问题是可以接受的无线电干扰限制和测量无线电干扰的方法。从此开始了对电磁干扰及其控制技术的世界性的有组织的研究。1934年到1939年，CISPR会议录和报告的发表提供了关于测量接收机的设计、场测量等的资料；规定了频段0.15MHz~18MHz的无线电噪声和场强仪；对架空电力传输线附近的无线电广播场强和无线电噪声场强进行了实际测量；在160kHz~1605kHz的频率范围内，发展了测量来自电气设备的传导无线电噪声的步骤；设计并制造了用于上述测量的测量接收机、无线电噪声场强仪和其他测试设备。

1934年，英国人详细分析了1000多个与无线电干扰相关的案例所产生的故障，发现这些无线电干扰来自电动机、开关和汽车点火装置的运行，并观察了来自电力牵引和电力输电线的干扰。

为解决干扰问题，保证设备和系统的高可靠性，在20世纪40年代初提出了电磁兼容性（EMC）的概念。从此，电磁干扰问题便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的系统工程，虽然在早期这些工作进行得还比较零散，但随着各国陆续建立起相关的科研机构，电子设备防干扰研究工作逐步走入正轨。

第二次世界大战期间，军方对使用电信和雷达设备有广泛兴趣，并对无线电干扰以及比

正常无线电广播频率更高的频段产生了兴趣。20世纪40年代,军方的这些兴趣导致了军标的研究以及对直到20MHz的电磁干扰进行可靠测量的测试设备的开发(20世纪50年代,频率提高到30MHz;20世纪60年代,频率提高到1000MHz)。1944年,德国电气工程师协会制定了世界上第一个电子设备防干扰规范VDE0878。1945年,美国国防部颁布了最早的电子设备防干扰方面的军用标准和设计规范JAN-I-225,一开始,军方执行的标准就非常严格。在航空、航天系统和卫星技术中,电磁干扰的概念和消除这种干扰行之有效的具有最重要的意义,并由此导致了許多面向实际技术的工作,然而,其成果长期处于保密状态。

在此阶段,除了研究感性、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,有关射频干扰的专门刊物《Radio Frequency Interference》就曾经报道了不少科研成果,直至1964年,专刊业务范围不断扩大,改名为EMC专刊,并沿用至今。

第二次世界大战后期,随着无线电通信非军事应用的日益增加,在制造各种电信产品的过程中,电磁干扰问题和防干扰设计原理的需求变得更明显。涉及干扰机理及其效应的研究、测量技术以及使电磁干扰最小化的设计步骤,在美国和欧洲的许多国家成为研究的热点问题。在这一时期,为了估计几种电子设备及系统发射的无线电噪声,人们做了许多实际测量。像美国FCC(The Federal Communications Commission)和英国BSI(The British Standards Institution)这样制定规章的国家机构,开始颁布适用于他们各自国家的干扰控制极限。1948年,前苏联制定并颁布了《工业无线电干扰的极限容许值标准》。

20世纪60年代后,电气与电子工程技术向高频、高速、高灵敏度、高安装密度、高集成度和高可靠性方向发展,其应用范围越来越广,渗透到了社会的每一个角落,其中包括数字计算机、信息技术、测试设备、电信和半导体技术。在所有这些技术领域内,电磁噪声和克服电磁干扰引起的问题引起人们的高度重视,导致了电磁噪声领域的世界范围的许多技术研究。较大规模的国际性电子设备防干扰学术会议,每年召开一次。

随着欧洲自由贸易区(The European Free Trade Area)的出现,欧洲国家特别注意制定并执行控制电磁噪声辐射和电磁噪声抗扰性极限的统一标准。为了使欧洲的工厂能够在全欧洲出售他们的产品,采用统一的生产和检测的标准是十分必要的。因此,在欧洲经济共同体内,欧洲电气产品标准委员会在1973年成立,它负责制定设备的电磁噪声和执行极限的已协调的欧洲标准,这些标准涉及无线电接收机、电视机、信息技术设备和工业科学医疗设备等。

20世纪80年代,数字技术及其在工业自动化方面的应用,在世界范围促进了与电磁噪声相关问题的研究。数字电路和设备产生的大量电磁噪声,基本上是数字设备中脉冲所引起的宽带噪声。在数字电路和数字设备中的时钟频率也会产生电磁噪声。数字电子设备广泛使用了固态器件和集成电路,固态器件和集成电路易于被瞬态电磁噪声所损坏。因此,为了保护敏感的半导体器件不受电磁环境的损坏,必须采用特殊设计和工程方法。美国的FCC、德国的FTZ(Fernmelde Technisches Zentralamt)、英国的BSI、日本的VCCI(Voluntary Control Council for Interference)和其他国家的类似协会,颁布了控制电磁噪声发射和抗扰性技术要求的执行标准。政府内的专门机构,诸如美国的NASA(The National Aeronautics and Space Administration,国家航空和航天管理局)、NTIA(The National Telecommunication and Information Agency,国家电信和情报局)以及其他国家的类似组织,发布了控制电磁辐射和电磁抗扰性的执行标准。诸如ICAO(The International Civil Aviation Organisation,国际民用航空组织)、IMCO(The International Maritime Consultative Organization,国际海事协商组织)这样一些国际组织,也把相当的注意力集中于电磁噪声和电磁噪声允许的极限。

20 世纪 90 年代, 美国、德国、日本、前苏联、法国等经济发达国家在电子设备防干扰研究和应用方面达到了很高的水平。研制出高精度的电磁干扰及电磁敏感度自动测量系统, 开发出多种系统内和系统间防干扰分析和预测软件, 形成了一套完整的设计体系, 还开发成功多种抑制电磁干扰的新材料和新工艺。防干扰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。在产品的设计、加工、检测、试验和使用的各个阶段都要考虑防干扰技术和管理。电磁兼容性成为产品可靠性保证中的重要组成部分。

与此同时, 电子设备防干扰达标认证已由一个国家范围发展到一个地区或一个贸易联盟采取统一行动。从 1996 年 1 月 1 日开始, 欧洲共同体 12 个国家和欧洲自由贸易联盟的北欧 6 国共同宣布实行电磁兼容性许可证制度, 使得电子产品防干扰认证与安全性认证处于同等重要的地位。

21 世纪, 电子设备防干扰工程已经从事后检测处理发展到预先分析评估、预先检验、预先设计。防干扰工程师与产品设计师、制造商以及各方面的专家共同合作, 在方案设计阶段就开展有针对性的预测分析工作, 把过去用于研制后期试验测量和处理以及返工补救的费用安排到加强事前设计和预测检验中。电子设备防干扰技术已成为现代工业生产并行工程系统的实施项目组成部分。

1.1.2 国内的发展概况

我国由于过去的工业基础比较薄弱, 电磁环境危害尚未充分暴露, 对电子设备防干扰的认识不足, 因此, 对防干扰理论和技术的研究起步较晚, 与国际间的差距较大。我国第一个防干扰标准是 1966 年由原第一机械工业部制定的部级标准 JB-854—66《船用电气设备工业无线电干扰端子电压测量方法与允许值》。直到 20 世纪 80 年代初, 才有组织地、系统地研究并制定国家级和行业级的电子设备防干扰标准和规范。1981 年颁布了第一个较为完整的标准 HB5662—81, 即《飞机设备电磁兼容性要求和测试方法》。此后, 在标准和规范的研究与制定方面有了较大进展。

20 世纪 80 年代以来, 国内电子设备防干扰学术组织纷纷成立, 学术活动频繁开展。1984 年, 中国通信学会、中国电子学会、中国铁道学会和中国电机工程学会在重庆召开了第一届全国性电子设备防干扰学术会议, 此次会议录用论文 49 篇。1992 年 5 月, 中国电子学会和中国通信学会在北京成功地举办了“第一届北京国际电磁兼容学术会议”。此次会议录用论文 173 篇, 这标志着我国电子设备防干扰学科的迅速发展并参与国际交流。

20 世纪 90 年代以来, 随着国民经济和高新科技产业的迅速发展, 在航空、航天、通信、电子、军事等部门, 电子设备防干扰技术受到格外重视, 并投入了较大的财力和人力, 建立了一批试验和测试中心, 引进了许多现代化的电磁干扰和敏感度自动测试系统和试验设备。一些军事部门、企业、研究所及大学陆续建立了研究实验室, 电子设备研究、设计及制造单位也都纷纷配备了防干扰设计、测试人员, 电子设备防干扰工程设计和预测分析在实际的科研工作中得到了长足的发展。

电磁污染作为环境污染的一种, 其危害性已日益引起我国政府的重视。国家环境保护局针对信息传递中的电磁波发射, 工业、科学、医疗应用中的电磁辐射, 高压送变电中产生的电磁辐射, 于 1997 年 3 月 25 日发布实施《电磁辐射环境保护管理办法》。国家出入境检验检疫局的 1998 年 122 号文件颁布了“关于对 6 种进口商品实施电磁兼容强制检测的通知”, 规定对计算机、显示器、打印机、开关电源、电视机、音响设备等 6 种进口商品, 自 1999 年 1

月1日起强制执行电磁兼容检测。1999年,国家质量监督局发布了《EMC认证管理办法》。

现在,我国已将产品的电磁兼容性要求纳入了国家强制性俗称“3C”的电子产品认证范围,规定从2003年5月1日起凡列入国家强制性产品认证目录的产品未经认证不得出厂、进口和销售,从而保证电子产品的质量和提高市场竞争力。

国内部分高等院校相继开设了电子设备防干扰原理、技术和设计课程,翻译和编写了一批教材。在电子设备防干扰工程设计和预测分析方面也开展了研究并逐渐开始实际应用。从近几年的本科生、研究生的就业情况看,我国急需大批电子设备防干扰工程师。

1.2 电子设备防干扰的意义和特点

1.2.1 电子设备防干扰的重要性

1. 为了电子设备工作的可靠性

设备的小型化使干扰源与敏感器件靠得很近。这使传播路径缩短,增加了干扰的机会。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,许多汽车装有包括防抱死控制系统在内的大量的电子电路,如果汽车电话与这个控制系统不兼容,则会引起误动作。有时,电磁干扰不仅影响电子设备的正常工作,甚至造成电子设备中的某些元器件损害。

互联技术的发展降低了电磁干扰的阈值。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;精细的几何尺寸在较低的电平下就受到电弧损坏;快速的同步操作产生更尖的电流脉冲,这会带来从I/O端口产生宽带发射的问题。一般来说,高速数字电路比模拟电路产生更多的干扰。

通常,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,为了减轻质量、降低成本,越来越多地采用塑料机箱。塑料机箱对与电磁干扰是透明的,因此敏感器件处于无保护的状态。

在竞争日益激烈的工业生产中,可靠性已经成为电子设备的一个重要市场特征。自动化设备,特别是医疗设备,必须连续工作,这时设备内的EMI屏蔽技术提高了设备的可靠性。因此,对电子设备的防干扰技术要给予充分的重视。既要注意电子设备不受周围电磁干扰而能正常工作,又要注意电子设备本身不对周围其他设备产生电磁干扰,影响其他设备正常运行。

2. 为了电子设备的国际接轨

当前,电子设备防干扰设计已由事后处理发展到预先分析、预测和设计,成为现代工程设计中的重要组成部分。电子设备防干扰达标认证已由一个国家范围向全球地区发展,使电磁兼容性与安全性、环境适应性处于同等重要地位。

例如,欧共体将电子设备的防干扰要求纳入技术法规,强制执行89/336/EEC指令,规定从1996年1月1日起电气和电子产品必须符合电磁兼容性要求,并加贴CE标志后才能在市场销售。

为了与国际接轨,我国外经部和国家出入境检验局于1999年1月起对个人计算机、显示器、打印机、开关电源、电视机和音响设备实施电磁兼容性强制检测。国家技术监督局规定从2002年10月起陆续对声音和电视广播设备、信息技术设备、家用电器、电动工具、电源、

照明电器、电点火驱动装置、金融结算电子设备、安防电子产品和低压电器实施电磁兼容性强制性认证。

3. 为了人身和某些特殊材料的安全

现在，人们越来越开始注意各种辐射对健康的影响。电磁能量通过对人体组织的物理和化学作用会产生有害的生理效应。过量的X射线和紫外线照射的危险已经被充分证明了。现在讨论的焦点是微波和射频显示单元产生的辐射对妇女健康的伤害，因为已经有充分的证据说明在高压线附近生活会患疾病。

电磁波通过与电爆装置的控制电路感应耦合，形成的干扰电流可能引起电爆装置的爆炸。因此 GJB786 中规定，电引爆器导线上的电磁干扰感应电流和电压必须小于最大不发火电流和电压的 15%。另外，各种燃油在强电磁场的作用下（直接照射、电火花、静电放电）有发生燃烧和爆炸的危险；因此，为了人身和某些特殊材料的安全，GJB786 中还规定，电子设备的电磁辐射量连续波的平均功率密度不允许超过 $4\text{mW}/\text{cm}^2$ ，脉冲波的平均功率密度不允许超过 $2\text{mW}/\text{cm}^2$ 。

4. 为了重要信息的保密

数据的保密要求是屏蔽技术发展的一个重要动力。已有报道披露美国驻莫斯科大使馆中的信息曾经被前苏联窃取到，这是通过接收使馆内设备产生的电磁能量来实现的。同样的技术也被用来截获密码，然后攻击银行计算机系统。通过屏蔽，能够减小设备的电磁辐射能量，提高系统的安全性。

5. 为了当今和未来战争的需要

核爆炸时产生的电磁脉冲，以光速向外辐射传播，其电场强度可达 $105\text{V}/\text{m}$ ，磁场强度可达 $260\text{A}/\text{m}$ ，脉冲宽度为 20ns 量级，电磁脉冲峰值处频率为 10^5Hz 。这种电磁脉冲作用于电子设备时，轻者造成电子设备性能恶化，重者造成电路元器件损坏。

特别是在当今和未来战争中，已经应用的电磁脉冲弹和正在研制的高功率微波武器都具有类似核爆炸时产生的电磁脉冲辐射，将对电子设备构成致命威胁。而电子设备防干扰技术可以为对抗这种威胁提供基本技术指导。

1.2.2 电子设备防干扰的学科特点

电子设备防干扰学科是一个新兴的综合性交叉学科。初学者只有对电子设备防干扰学科的特点有清楚的认识才能减少“入门”的障碍，掌握学习的切入点。电子设备防干扰学科主要的特点有以下几个方面。

1. 学科体系以电磁场理论为基础

分析电磁干扰源的干扰特性、预测其对敏感设备的潜在威胁和探索控制干扰的措施都要采用电磁场理论的方法和结论。各种仿真、测量和试验、电磁干扰的数值分析方法在防干扰工程中的广泛应用也离不开电磁场理论的支持。

2. 是一门新兴的综合性交叉学科

电子设备防干扰学科与很多学科互相交叉、渗透。它不仅直接应用和涉及数学、电磁场理论、电工原理、电子技术、通信理论、材料科学、计算机与控制理论、核物理学、电磁测量、信号分析、自动控制、生物医学、材料及工艺、机械结构等知识，而且与舰船、飞机、卫星、雷达、广播通信、导弹武器、车辆、宇宙飞船、电力和电子仪器等密切相关。它是在

无线电抗干扰技术的基础上,经过扩展、延伸和系统化所形成的一门新兴学科,也是电力、电子和其他相关专业工程师必须掌握的基础知识和技术。

3. 计量的单位具有特殊性

在电子设备防干扰领域,无论是标准、规范,还是测量、试验方法,广泛采用 dB 作单位,如采用 dBW、dBV、dBA 作单位依次表示功率、电压、电流的相对大小。

4. 大量引用无线电术语

电磁干扰起初仅在无线电技术中显得较为突出,然而随着半导体微电子技术的迅猛发展及电子技术的广泛应用,使防干扰从无线电抗干扰技术的基础上延伸到所有用电设备和系统,从而确立了电子设备防干扰学科的公共技术基础地位。在学科的形成和发展过程中,大量沿袭了无线电技术的概念和术语,例如,有时把导线之间的电磁相互耦合称为“串音”;时变电磁场在导线上产生的响应称为“电磁场激励”等。

5. 具备极强的实用性

电子设备防干扰是一门实用性极强的学科。它起源于解决实际无线电干扰问题,又在处理用电设备或系统的防干扰过程中获得了发展。现代生活中,电子设备的数字化、信息处理的高速化、设备构件的小型化和非金属化使电子设备或系统的抗干扰能力不断降低。为什么会产生这样的效应呢?首先,现代数字逻辑和信号处理与基于电的旧技术相比有低的门限电压,抗扰性较差;其次,在追求高处理速度的过程中,使用了较短的脉冲上升时间,根据辐射机理这种脉冲具有长距离的传播能力;第三,现代电子设备的外壳设计更多地使用塑料而非金属化,显然,与全金属机箱相比就大大降低了其固有的电磁屏蔽能力;最后,小型化以及由此而引起的密集设计的趋势使各个元件、器件、组件和连接线等的空间布局缩小,所以也带来了防干扰问题。

6. 强烈依赖测量技术

电子设备防干扰学科所面对的研究对象,无论其频域特性还是时域特性都十分复杂。研究对象的频率范围非常宽,使得电路中的集中参数与分布参数同时存在,近场与远场同时存在,传导与辐射同时存在。所以,在观察与判断物理现象或解决实际问题时,实验与测量具有重要的意义。

在电子设备设计和试制阶段,必须进行防干扰测量。这种诊断性的测量有助于识别潜在的干扰问题范围,有助于测试各种补救方法的有效性。产品完成制造后,必须依据防干扰标准进行严格的试验测量,确保设备或系统在规定的电磁环境中安全、可靠地运行。

1.3 电子设备防干扰的研究内容

1.3.1 电磁干扰特性及其传播耦合理论

人们为了抑制电磁干扰,首先必须了解电磁干扰的特性和它的传播机理。对于电磁干扰源的研究,包括电磁干扰源的频域和时域特性、产生的机理以及抑制措施等;对于电磁干扰传输特性的研究,包括对传导和辐射特性的研究。例如,根据干扰信号的频谱特性可以了解它是宽带还是窄带干扰;根据干扰信号的时间特性可知其为连续波、间歇波,还是瞬态波,以便采取不同的措施加以抑制。

1.3.2 电磁危害及电磁频谱的利用和管理

人为的电磁污染已成为人类社会发展的第一大公害。电磁危害主要表现为射频辐射、核电磁脉冲放电和静电放电（ESD）对人体健康的危害；对电引爆装置和燃油系统的破坏、对电子元器件及其电路功能的损害等，这些危害将影响到安全性和可靠性。

在关注电磁能危害的同时，人们还清醒地认识到了人为的电磁频谱污染问题已相当严重。电磁频谱是不可见的，是一个有限的资源，当前在全球范围内被占用的频谱范围和数量日益扩张，频谱利用方法的进展远慢于频谱需求的增加。对此，联合国及各国政府均建立了专门机构，进行科学的频谱分配与管理，并对各种电子设备产生的辐射杂波加以严格限制，从而确保良好的电磁环境。在我国，中国无线电管理委员会负责分配和协调无线电频段。

1.3.3 电磁耦合的工程分析和防干扰控制技术

在实际工程中，电磁干扰的传播和耦合很少以单一形态发生，而是多种耦合特性的组合，表现为综合性耦合模式，例如两根平行导线间的电磁耦合实质是电容性耦合和电感性耦合的综合；电磁场对导线感应耦合并传输到导线终端的耦合模式，实际上是空间辐射耦合和传输线传送两种基本形态的组合。这些典型的耦合模式在实际工程分析中通常作为一种固定的工程模式直接用于分析更复杂的电磁干扰问题，从而使电子设备防干扰工程分析的理论更加成熟。因此，分析和研究典型耦合模式有助于快速识别干扰机理。

工程实践中广泛采用的滤波、屏蔽、接地、搭接和合理布局等抑制电磁干扰的技术措施都是有效的。但是随着设备和系统的集成化、数字化和处理信息的高速化，以上措施的采用往往会与成本、质量、功能要求产生矛盾，必须权衡利弊研究出最合理的措施来满足防干扰要求。另外，新材料及新工艺的出现，使得电子设备防干扰控制技术不断向前发展，新的抑制电磁干扰的措施不断涌现。

1.3.4 防干扰设计理论和方法

任何一项工程设计，最主要的是对费效比的考虑，它也是电子设备防干扰设计的一项重要指标。在一个产品从设计到投产的过程中，可以分为设计、试制和投产3个阶段，若在产品设计的初始阶段解决电磁干扰问题，花钱最少，控制干扰的措施最容易实现。如果等到产品投产后发现干扰问题再去解决它，成本就会大大上升。因此费效比的综合分析是电子设备防干扰设计研究的一部分。

电子设备防干扰设计是在功能设计方案基础上进行的，防干扰工程师必须和系统工程师密切配合，反复协调，把防干扰设计作为系统设计的一部分。

1.3.5 防干扰测量和试验技术

电子设备防干扰测量和试验研究是至关重要的，它贯穿于系统分析、建模、产品开发、产品检验、干扰诊断等各个阶段。为了对设备进行敏感度测量，需要研制多种模拟信号源及其装置来模拟产生传导和辐射干扰信号，因此推动了试验装置的研究开发，促进了测量和试验设备的自动化程度不断提高。高精度的电磁干扰及电磁敏感度自动测量系统的研制、开发并应用于工程试验，这些都是电子设备防干扰学科研究的重要内容。