

 **电磁兼容**
理论与应用技术丛书

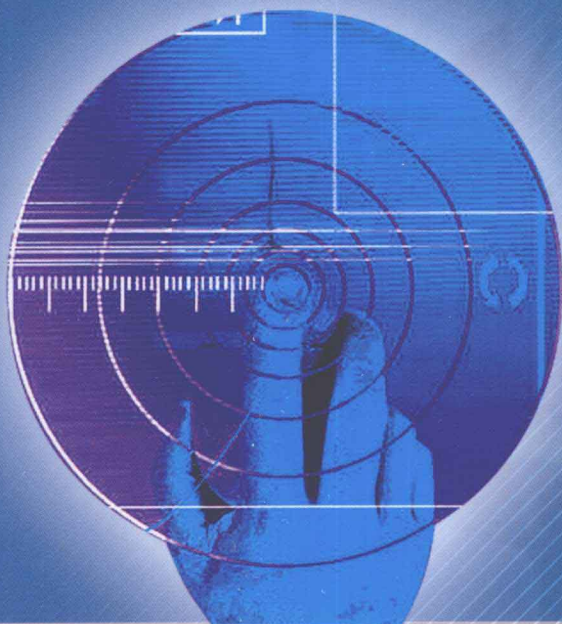


电磁 兼容设计

DIANCI
JIANRONG SHEJI

白同云◎编著

(第2版)



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

电磁兼容理论与应用技术丛书

电磁兼容设计

(第2版)

白同云 编著

北京邮电大学出版社

·北京·

内 容 简 介

电磁兼容学是一门尖端的综合性学科。由于电能的应用越来越广泛,许多电磁干扰问题仍在困扰着人们的生产和生活,电磁兼容的重要性将越来越得到重视。工业产品的电磁兼容设计是治理电磁环境、实现可持续发展的必要手段。

本书用 8 章的篇幅分别介绍了电磁兼容设计的概念、基础、方法、仿真及应用。

图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容设计/白同云编著. --2 版. --北京:北京邮电大学出版社,2011.6

ISBN 978-7-5635-2646-6

I. ①电… II. ①白… III. ①电磁兼容性—设计 IV. ①TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 121086 号

书 名: 电磁兼容设计(第 2 版)

作 者: 白同云

责任编辑: 何芯逸 时友芬

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)

发 行 部: 电话:010-62282185 传真:010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京忠信诚胶印厂

开 本: 787 mm×960 mm 1/16

印 张: 17.25

字 数: 371 千字

印 数: 1—3 000 册

版 次: 2011 年 6 月第 1 版 2011 年 6 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-2646-8

定 价: 32.00 元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

第2版序

《电磁兼容理论与应用技术丛书》初版十年以来，受到了广大读者与有关方面的欢迎与支持，部分分册还进行了多次印刷。在此，特表示深深的谢意。为了反映电磁兼容理论与应用技术近年来的发展与新成果，充实与提高本丛书各分册的内容和水平，现对本丛书进行了修订再版，各分册的主题基本不变，希望继续得到读者与有关方面进一步的帮助与指正。

今年恰逢“十二五”开局之年，现今国家面貌发生了新的历史性变化，“十二五”规划的蓝图令人期待。加快转变经济发展方式是我国经济社会领域的一场深刻变革，我们决心进一步推动电磁兼容理论与应用技术和电磁兼容教育的发展，促进电磁环境保护力度，增强经济社会全面协调可持续发展的能力，为实现“十二五”时期经济社会发展目标任务，贡献自己的一切力量。

本丛书的撰写是在北京邮电大学出版社和以高攸纲教授为主编、白同云教授为副主编的《电磁兼容理论与应用技术丛书》再版编委会统一指导下进行的，由他们对丛书的修订进行了统一安排和审定。由于作者水平有限，不妥之处在所难免，敬希指正。

高攸纲
2011年1月

第 1 版序

电磁兼容一般指电气及电子设备在共同的电磁环境中能执行各自功能的共存状态，即要求在同一电磁环境中的上述各种设备都能正常工作又互不干扰，达到“兼容”状态。现在电磁兼容科技工作者又进一步探讨电磁环境对人类及生物的危害影响，学科范围已不仅限于设备与设备间的问题，而进一步涉及到人类本身，因此一些国内外学者也把电磁兼容学科称作“环境电磁学”。

当前，在有限的时间、空间及有限的频谱资源条件下，各种电气及电子设备的数量迅速增加，而家用电器的运用，更使这些设备遍及千家万户，用电设备密集程度越来越大，空间电磁环境恶化已成定局。特别是我国即将加入世界贸易组织，更需加强我国在国际市场上的竞争能力，为此，电磁兼容知识亟待宣传普及，同时研究开发电磁兼容新技术，采取行之有效的防护措施，以便使国人在高度享受物质文明及精神文明的同时，仍能确保社会生产生活能够得到良性的持续发展。

有鉴于此，北京邮电大学出版社及时组织我们编写了这套《电磁兼容理论与应用技术丛书》。丛书计有五个分册。第一分册主要对电磁环境、电磁兼容技术及相关学术组织机构作了简要的总体介绍，并对工频场的电磁兼容问题进行了深入的分析。第二分册主要是电磁兼容设计方面的内容，在介绍了电磁兼容基本原理的基础上，提出如何对设备产品进行电磁兼容预测，对可能出现的各种干扰进行了分析，并提出抵制干扰的各项措施。第三分册重点介绍了电磁兼容的试验场地、测量设备、测量仪器及详尽的测量方法，对测量设备的计量校准及测试误差分析也进行了阐述。第四分册主要介绍国内外各项现行电磁兼容标准以及规范，对认证组织机构也有介绍。第五分册专就电磁环境对人类及生态的危害影响及相关防护措施进行了系统的论述。

该丛书由高攸纲教授任主编，由郭鹄及白同云两位教授任副主编，由他们对丛书的内容章节，进行了统一安排和审订。

丛书理论结合实际，可供大专以上水平的科技人员阅读参考，也可供电磁兼容研究领域的本科生及研究生用作辅助教材。

高攸纲
2001 年 3 月

第2版前言

人才是我国经济社会发展的第一资源。到2020年,我国将培养和造就规模宏大、结构优化、布局合理、素质优良的人才队伍,确立国家人才竞争比较优势,进入世界人才强国行列。

实践证明,能完成电磁兼容设计的工程师,将决定未来电子信息技术的发展。士者,国之重器;得士则重,失士则轻。未来十几年,是我国电磁兼容设计人才发展的重要机遇期。我们必须进一步增强责任感、使命感和危机感,积极应对日趋激烈的国际人才竞争,主动适应我国经济社会发展需要,坚定不移地走人才强国之路,科学规划,深化改革,重点突破,整体推进,不断开创电磁兼容设计人才辈出、人尽其才的新局面。

进行电磁兼容设计的正确方法,应做到标本兼治,重在治本。就是从治理电磁兼容问题的源头出发,按重要性的先后,分为若干层次进行设计,并加以综合分析,进行适当调整,直到完善。这就是本书作者于2000年5月在“全国电磁兼容标准与质量认证研讨会”上,首次提出的“电磁兼容分层与综合设计法”。本书初版后,本书作者在全国各地为各科研院所、高校、部队和企业等单位的电磁兼容专业技术人员进行了培训和推广。十年来,一批企业先后走出“测试修改法”导致电磁兼容试验失败的“怪圈”,做到在产品设计之初,就运用“电磁兼容分层与综合设计法”主动进行电磁兼容设计,并使电磁兼容设计的投入减少到成本的1%(以前国内一般为5%~10%),既降低了成本,又缩短了研发时间。同时,由于现场演示和讨论,也使“电磁兼容分层与综合设计法”更加充实与完善,为此书第2版提供了素材。

2010年,我实现了母校清华大学蒋南翔老校长生前倡导的“为祖国健康工作五十年”的号召。五十年来,长期在高校从事电磁场理论、微波技术、微波计量、电磁兼容学等课程教学与科研;1977年参加毛主席纪念堂工程,亲手敬制毛主席水晶棺;1992年我作为特聘专家,调入解放军总参谋部机要局某中心任总工程师;1997年被北京交通大学聘为兼职教授,讲授博士生课程、担任博士学位答辩委员会委员;1999年至2001年,在中国科学院电子学研究所参加L-SAR侦察卫星和侦察机电磁兼容设计;2001年重返清华园工作,2002年被清华大学工程物理系聘为兼职教授,参加电磁兼容学科建设,制定教学计划、教学大纲,编写教材,为本科生和研究生讲授电磁兼容设计,引进实验设备、建设电磁兼容实验室,并建成了屏蔽室;培养讲课教师、辅导教师和实验人员;在辐射成像设备、核监测设备和爆炸物检测设备等产品研发工作中,在功能设计的同时,做好电磁兼容设计。至今,重返母校怀抱工作已进入第十年,母校前进

的步伐一直在鼓舞着我,我还将努力工作下去,做到“小车不倒只管推”。2011年将迎来母校百年华诞,我谨以此书第2版献给母校,我决心和母校一起,为祖国进入世界人才强国行列而奋斗。

近年来,我国科技工作者在电磁兼容设计方面进行了大量卓有成效的工作,取得了显著的成果。本书在初版的基础上,作为《电磁兼容理论与应用技术丛书》的一个分册,力求在第2版中进一步概括地反映电磁兼容设计的全貌。

本书共8章。第1章和第2章介绍电磁兼容设计的基本概念和设计的基础;第3章至第7章介绍电磁兼容分层与综合设计法;第8章介绍电磁兼容仿真中的算法研究及应用。在本书编写过程中,参阅了我以前发表的论文和书籍。

本书的撰写是在以北京邮电大学高攸纲教授为主编的《电磁兼容理论与应用技术丛书》再版编委会统一指导下进行的,他们给予了作者许多热情的帮助与支持,特表示衷心的感谢!由于作者水平有限,不妥之处在所难免,敬希指正。

白同云
于清华大学工程物理系
2010年10月

第 1 版前言

20 世纪, 人类取得了辉煌的科技成就。从量子理论、相对论的创立、脱氧核糖核酸双螺旋结构的发现、信息科学的诞生, 到人类基因组序列“工作框架图”的绘就, 世界科技发生了深刻的革命, 社会生产力极大提高。可以预计, 21 世纪科学技术的进一步发展, 特别是信息技术和生命科学的不断突破, 将对世界政治、经济、文化生活产生更加深刻的影响。21 世纪初, 数字化将成为信息技术发展的新动力, 集成电路将进入集成系统的新阶段, 密集波分复用通信系统的传输能力将极大提高, 个人移动通信、因特网的技术和能力也将成倍提高。远程教育、远程医疗、电子商务、电子邮件、虚拟现实的发展, 将使人们的生产、学习和生活方式发生深刻的变化。

电磁兼容学是一门尖端的综合性学科。目前人类取得的科技成就和享受到的、高科技带来的深刻变化, 是同人类几十年来在电磁兼容方面所进行的努力密不可分的。与此同时, 由于电能的应用越来越广泛, 许多电磁干扰问题仍在困扰着人们的生产和生活, 电磁兼容的重要性将越来越得到重视。工业产品的电磁兼容设计就是治理电磁环境、实现可持续发展的必要手段。

近年来, 我国有关的科技工作者, 在电磁兼容设计方面进行了大量卓有成效的工作, 取得了显著的成果。本书作为“电磁兼容理论与应用技术丛书”的一个分册, 力求概括地反映电磁兼容设计的全貌。

本书共 9 章。第 1 章和第 2 章介绍电磁兼容设计的基本概念和设计的基础; 第 3 章至第 7 章介绍分层与综合的设计方法, 按照在电磁兼容设计中的重要性, 依次阐明有源器件的选择和印制电路板设计、地线设计、屏蔽设计、滤波设计以及瞬态骚扰的抑制等; 第 8 章介绍电磁兼容预测中的主要算法, 主要针对场的方法, 包括低频类、高频类算法; 第 9 章则侧重电磁兼容预测的应用: 在介绍预测步骤等基本问题的基础上, 就辐射骚扰、传导骚扰和线间串扰的典型问题进行预测分析及控制讨论; 最后介绍了几种应用软件, 供工作中参考。

本书的撰写是在以北京邮电大学高攸纲教授为主编的《电磁兼容理论与应用技术丛书》编委会和北京邮电大学出版社李杰社长的统一指导下进行的, 他们给予了作者许多热情的帮助与支持, 特表示衷心的感谢!

本书的第1章第1.1节至1.4节,第2章至第7章由白同云撰写,第1章1.5节、第8章和第9章由吕晓德撰写,最后由白同云统稿成书。由于作者水平有限,不妥之处在所难免,敬希指正。

白同云 吕晓德
于中国科学院电子学研究所
2000年11月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 电磁兼容设计的目的	1
1.1.1 电磁骚扰及其危害	1
1.1.2 电磁兼容	5
1.1.3 电磁兼容设计的目的	5
1.2 电磁兼容设计的基本内容与方法	7
1.3 电磁兼容性管理	8
1.3.1 论证阶段	8
1.3.2 方案阶段	8
1.3.3 工程研制阶段	9
1.3.4 定型阶段	10
1.3.5 生产和使用阶段	10
1.4 电磁兼容仿真	11
1.4.1 电磁兼容仿真的挑战	12
1.4.2 潜在应用领域	12
1.4.3 接头类型对 EMC 的影响	13
1.4.4 散热器辐射的评估	13
1.4.5 解决电缆耦合问题	13
习题	15
第 2 章 电磁骚扰源与耦合途径	16
2.1 电磁环境	16
2.2 电磁骚扰的特性与分类	17
2.2.1 电磁骚扰的特性	17
2.2.2 电磁骚扰分类	18
2.3 自然骚扰源与人为骚扰源	18
2.3.1 自然骚扰源	18
2.3.2 人为骚扰源	19
2.4 综合电磁环境	21
2.5 电磁骚扰的耦合途径	22

2.5.1	传导耦合	22
2.5.2	共阻抗耦合	23
2.5.3	感应耦合	25
2.5.4	辐射耦合	27
习题		29
第3章 有源器件的选择和印制电路板设计		30
3.1	有源器件敏感度特性和发射特性	30
3.1.1	电磁敏感度特性	30
3.1.2	电磁骚扰发射特性	32
3.1.3	ΔI 噪声电流和瞬态负载电流是传导骚扰和辐射骚扰的初始源	32
3.1.4	电源完整性	35
3.1.5	掌握 IC 设计和封装特性抑制 EMI	45
3.1.6	IC 偏置和驱动电源电压 V_{cc} 的选择	46
3.1.7	共模电流和差模电流	47
3.2	表面安装技术	50
3.2.1	当今 SMT 发展新趋势	51
3.2.2	新型片式器件的发展态势	52
3.3	在印制板级控制电磁发射和抗扰度	52
3.3.1	印制电路板概述	52
3.3.2	印制电路板设计	55
3.3.3	高密度电子组装技术	64
3.3.4	印制电路板布局	65
3.4	高速数字电路设计	66
3.4.1	高速数字电路设计的特点	66
3.4.2	集总参数系统与分布参数系统	67
3.4.3	传输线	68
3.4.4	高速信号	71
3.4.5	高速 PCB 设计与信号完整性	71
3.4.6	如何保证信号完整性	72
3.4.7	DVD 视盘机电磁骚扰抑制方法	74
3.4.8	数字 AV 产品电磁兼容设计	75
习题		79
第4章 接地设计		81
4.1	接地设计的重要性	81

4.1.1 接地设计是重在治本的重要一层	81
4.1.2 接地是最有效的抑制骚扰源的方法	82
4.2 接地方式	82
4.2.1 悬浮地	83
4.2.2 单点接地	83
4.2.3 多点接地	85
4.2.4 混合接地	86
4.2.5 多级电路的接地	88
4.2.6 大系统接地	89
4.3 长地线的阻抗	91
4.4 接地要求	93
4.5 地环路问题	94
4.5.1 隔离变压器	96
4.5.2 光隔离器	97
4.5.3 共模扼流圈	97
4.5.4 平衡电路	98
4.5.5 将一端浮地或串联电感或串联电容	99
4.6 屏蔽电缆的接地	99
4.6.1 屏蔽层接地产生的电场屏蔽	99
4.6.2 屏蔽层接地产生的磁场屏蔽	100
4.6.3 地环路对屏蔽的影响	100
4.7 搭 接	101
4.7.1 搭接的作用与要求	101
4.7.2 电搭接的一般方法	102
4.7.3 微机系统对外发射的几种抑制措施	102
4.7.4 PLC 控制系统电磁兼容设计	106
习题	109
第 5 章 屏蔽设计	110
5.1 产品电磁兼容设计应做到标本兼治	110
5.2 屏蔽原理及屏蔽材料新进展	112
5.2.1 屏蔽原理	112
5.2.2 结论	116
5.2.3 电磁屏蔽材料新进展	117
5.3 实际屏蔽体的问题	118
5.3.1 缝隙屏蔽	119

5.3.2	截止波导式通风板	130
5.3.3	发泡金属通风窗	134
5.3.4	显示器:采用导电玻璃	134
5.3.5	操作器件的处理	136
5.3.6	指示灯、表盘的处理	136
5.3.7	穿过屏蔽体的导线	137
5.3.8	互连设计的重要性	138
5.4	电缆辐射及其抑制	138
5.4.1	电缆的天线效应	138
5.4.2	电缆屏蔽层的类型	139
5.4.3	滤波器连接器	140
5.4.4	板上滤波器与馈通滤波器	143
5.4.5	馈通滤波器的类型	145
5.5	吸波材料在 EMC 中的技术应用	146
5.6	接续设计	147
	习题	148
第 6 章	滤波设计	149
6.1	滤波器的构造	150
6.1.1	影响滤波器的关键特性之一:阻抗关系	151
6.1.2	寄生电抗	151
6.1.3	元件放置	152
6.2	滤波器元件	153
6.2.1	三端电容器	153
6.2.2	馈通电容器	154
6.3	电源线滤波器	154
6.3.1	共模和差模骚扰信号	155
6.3.2	电源线 EMI 滤波器的网络结构——反射式低通滤波器	156
6.3.3	影响滤波器的关键特性之二:插入损耗	157
6.3.4	失配端接	158
6.3.5	影响滤波器的关键特性之三:电源线 EMI 滤波器的安装	159
6.4	EMI 信号滤波器	163
6.4.1	EMI 信号滤波器的基本概念	163
6.4.2	EMI 信号线滤波器的特点	164
6.5	铁氧体 EMI 抑制元件	165
6.5.1	铁氧体的应用	166

6.5.2	吸收式低通滤波器	166
6.5.3	铁氧体 EMI 抑制元件的应用	168
6.5.4	铁氧体 EMI 抑制元件的选择	169
6.5.5	铁氧体 EMI 抑制元件的安装	170
6.6	宽频带抗电磁骚扰材料	170
6.7	几种实用的滤波器	172
	习题	173
第 7 章	瞬态骚扰的抑制	174
7.1	抗扰度试验性能判据	174
7.2	电快速瞬变脉冲群	174
7.2.1	对 EFT 的说明	175
7.2.2	受试设备不能通过 EFT 试验的原因	177
7.2.3	抑制 EFT 的方法	181
7.3	雷击浪涌	181
7.3.1	全球雷击的一些数字	182
7.3.2	雷害形式——直击雷与感应雷	182
7.3.3	雷害带来的后果	183
7.3.4	雷击与瞬变脉冲电压	184
7.3.5	雷害的防护	187
7.3.6	其他保护技巧	189
7.4	静电放电产生的电磁骚扰	192
7.4.1	ESD 对电子设备的影响	193
7.4.2	静电防护	194
7.4.3	静电安全区	195
7.4.4	抗静电材料	196
7.4.5	减小 ESD 影响的设计导则	197
7.4.6	附加保护措施	199
7.4.7	静电放电试验	200
7.5	瞬态骚扰抑制器	200
7.5.1	避雷管	201
7.5.2	压敏电阻器	202
7.5.3	瞬态电压抑制器	202
7.5.4	高清晰度多媒体接口 HDMI 的 ESD 保护设计	204
7.5.5	USB 端口的静电放电(ESD)防护	205
7.5.6	选择 ESD 保护器件的方法	205

7.5.7 多级组合保护电路原理	205
7.5.8 嵌入式机器人控制器电磁兼容设计	205
习题	216
第8章 电磁兼容仿真算法研究及应用	217
8.1 引言	217
8.1.1 电磁干扰的耦合与传输	217
8.1.2 电磁兼容仿真的过程	218
8.2 信号完整性与电源完整性的仿真分析与设计	221
8.2.1 SI 信号完整性仿真工具	221
8.2.2 典型背板信号传输系统	223
8.2.3 版图完整性问题、分析与设计	223
8.2.4 电路完整性设计与分析	225
8.2.5 系统完整性设计与分析	227
8.3 高性能 PCB 信号完整性及电磁兼容仿真设计	228
8.3.1 数模混合电路板的 PI 和 SI 问题	229
8.3.2 PCB EMI 问题仿真	229
8.4 SpectraQuest 在高速设计中的应用	229
8.4.1 传统的 PCB 设计方法	230
8.4.2 Cadence 的 PCB 设计方法	230
8.4.3 噪声和振铃现象的理论分析和仿真结果	233
8.5 蒙特卡罗仿真在 GSM1800 与 3G 系统间电磁兼容研究中的应用	239
8.5.1 仿真的基本原理和方法	239
8.5.2 仿真结果及分析	243
8.6 系统、分系统、机箱机柜电磁兼容性 CST 解决方案	245
8.7 汽车电磁兼容仿真流程	247
8.7.1 汽车电磁兼容体系	247
8.7.2 汽车电磁兼容仿真流程与方法	248
8.7.3 电磁兼容仿真软件	250
8.8 常用 EMC 仿真软件	252
习题	253
附录 搭接中的电化学腐蚀	255
参考文献	257

随着现代科学技术的发展,电气及电子设备的数量及种类不断增加,使电磁环境日益复杂。在这种复杂的电磁环境中,如何减少相互间的电磁骚扰,使各种设备正常运转,是一个亟待解决的问题;另一方面,恶劣的电磁环境还会对人类及生态产生不良的影响。电磁兼容学正是为解决这类问题而迅速发展起来的一门新兴学科。

1.1 电磁兼容设计的目的

1.1.1 电磁骚扰及其危害

电磁骚扰发射(EMI Emission)是人们早已发现的古老问题。1881年英国著名科学家希维赛德发表了《论干扰》的文章,这是研究骚扰问题最主要的早期文献。1883年法拉第发现电磁感应定律,指出变化的磁场在导线中将产生感应电动势。1884年麦克斯韦引入位移电流的概念,指出变化的电场将激发变化的磁场,并由此预言电磁波的存在。这种电磁场的相互激发并在空间传播,正是电磁骚扰存在的理论基础。1887年柏林电气协会成立了“全部干扰问题委员会”,成员包括著名的赫姆霍兹、西门子等人。1888年赫兹用实验证明了电磁波的存在,同时该实验也指出了各种打火系统向空间发射电磁骚扰,从此开始了对电磁骚扰问题的实验研究。1889年英国邮电部门研究了通信骚扰问题,同期美国的《电子世界》杂志也刊登了电磁感应方面的论文。1934年英国有关部门对1000例骚扰问题进行了分析,发现其中50%是电气设备引起的。

民用射频干扰(RFI;Radio Frequency Interference)的研究始于无线电广播。约从20世纪20年代开始,各国都相继开展了广播业务,由于接收质量受到环境噪声的骚扰,工程刊物上开始发表有关文章。1933年有关国际组织在巴黎举行了一次特别会议,研究如何处理国际性无线电骚扰问题。与会者普遍认为,为避免商品贸易和无线电业务中出现障碍,需要在无线电骚扰测试方法和限值方面保证有一定的统一性并制定国际标准。会议

建议由国际电工委员会(IEC)和国际广播联盟(UIR)的国家委员会,并邀请有关国际组织,共同组织一个联合委员会。1934年6月28日至30日在巴黎举行了国际无线电干扰特别委员会(CISPR)第一次正式会议,从此开始了对电磁骚扰及其控制技术的世界性的有组织的研究。

那么,究竟什么是电磁干扰(Electromagnetic Interference)和电磁骚扰(Electromagnetic Disturbance)呢?

电磁干扰是指电磁骚扰引起的设备、传输通道或系统性能的下降。这里,电磁骚扰是指任何可能引起装置、设备或系统性能降低,或者对有生命或无生命物质产生损害作用的电磁现象。可见,电磁骚扰仅仅是客观存在的一种物理现象,而电磁干扰是由电磁骚扰引起的后果。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。严格地说,只要把两个以上的元件置于同一环境中,工作时就会产生电磁干扰的后果。随着科学技术的发展,人们在生产及生活中使用的电气及电子设备的数量越来越多,这些设备工作的同时,往往要产生一些有用或无用的电磁能量,这些能量会影响其他设备或系统的工作,这就是电磁骚扰。在两个系统之间的骚扰,称为系统间骚扰;在系统内部各设备之间的骚扰称为系统内骚扰。有人将电磁骚扰的危害程度分为灾难性的、非常危险的、中等危险的、严重的和使人烦恼的五个等级。那么,电磁骚扰究竟有些什么危害呢?

首先,介绍几个国外航天系统的故障事例:

(1) 土星V-阿波罗12事件

1969年11月14日上午,土星V-阿波罗12号火箭发射后,飞行正常。起飞后36.5s,飞行高度为1920m时,火箭遭到雷击。起飞后52s,飞行高度为4300m时,火箭又遭到第二次雷击。这便是轰动一时的大型运载火箭在飞行中诱发雷击的事件。

故障分析及试验研究的结果表明,此次事故是由于火箭及其火箭发动机火焰所形成的导体(火箭与飞船共长100m,火焰折合导电长度约200m)在飞行中,使云层至地面之间及云层至云层之间人为地诱发了雷电造成的。

(2) 丘比特导弹雷击事件

1961年秋,一系列的雷电使部署在意大利的美国丘比特导弹武器系统多次遭到严重的损坏。甚至系统中隔离较好、原以为与外界环境无关的元件也受到了严重的影响。

(3) 民兵I导弹飞行故障

民兵I导弹的遥测试验弹多次发射成功后,1962年开始进行战斗弹状态的飞行试验。前两发弹均遭到失败。这两发弹的故障现象相似,都是在I级发动机关机前炸毁的。一个高度为7.6km,另一个为21.8km。在炸毁前,两发弹的制导计算机均受到脉冲干扰而失灵。经过分析,故障是由于导弹飞行到一定高度时,在相互绝缘的弹头结构与弹体结构之间出现了静电放电,它产生的骚扰脉冲破坏了计算机的正常工作而造成的。

(4) 大力神III C运载火箭故障

1967年大力神III C运载火箭的C-10火箭在起飞后95s,飞行高度26km时,制导计