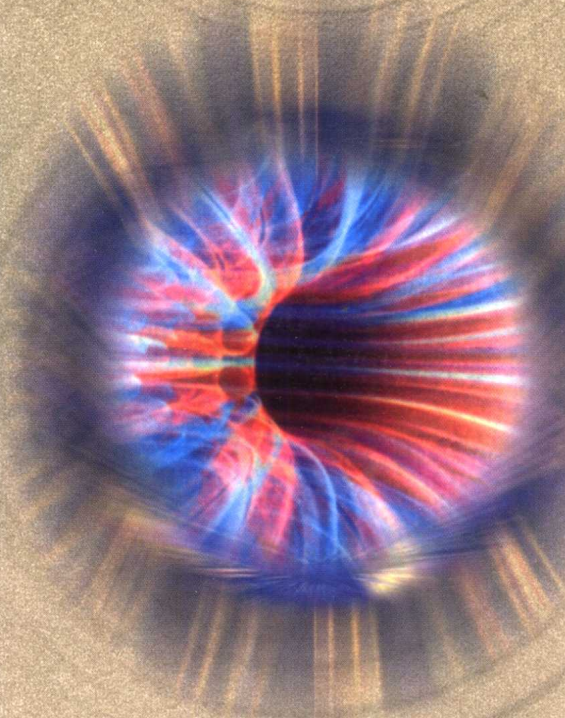


电磁兼容理论与应用技术丛书

电磁兼容总论

DianCi JianRong ZongLun

高攸纲 编著



45
9



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》

电磁兼容总论

高攸纲 编著

北京邮电大学出版社

·北京·

内 容 简 介

本书对电磁兼容学科作了简要的总体介绍,包括电磁兼容一词命名的由来、历史发展概况、现状及未来的展望、学科的研究对象、国内外的有关学术组织及其主要活动、电磁环境的保护以及频谱管理等内容。由于丛书的其余四个分册很少谈到自然界干扰源及工频电磁场的影响与防护,故本书较为深入地论述了这方面的问题。为了适应我国国防现代化的需要,书中还就核电磁脉冲效应及防护技术进行了扼要叙述。

图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容总论/高枚纲编著. — 北京:北京邮电大学出版社,2001.5

(电磁兼容理论与应用技术丛书)

ISBN 7-5635-0494-X

I. 电… II. ① 白…② 高… III. ① 电磁兼容性-理论 IV. TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 13324 号

电磁兼容总论

编 著 高枚纲

责任编辑 周 明

*

北京邮电大学出版社出版发行

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京源海印刷厂印刷

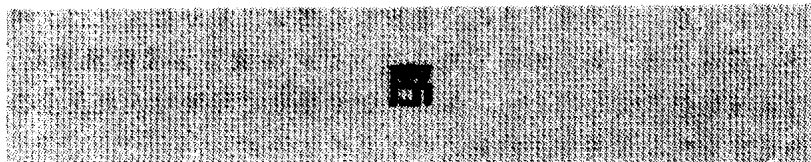
*

850 mm × 1168 mm 1/32 印张 6.25 字数 162 千字

2001 年 5 月第 1 版 2001 年 5 月第 1 次印刷

印数: 1—3 000 册

ISBN 7-5635-0494-X/TN·225 定价: 13.00 元



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，并提出抑制干扰的各项措施。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

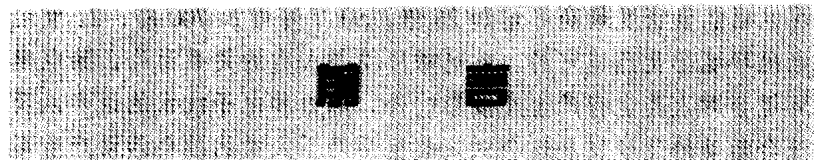
的测量方法,对测量设备的计量校准及测试误差分析也进行了阐述。第四分册主要介绍国内外各项现行电磁兼容标准以及规范,对认证组织机构也有介绍。第五分册专就电磁环境对人类及生态的危害影响及相关防护措施进行了系统的论述。

该丛书由高攸纲教授任主编,由郭鹤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



随着科学技术的进步，社会的物质财富及精神财富日益丰富多彩，人们的生活更加便利，但另一方面，科技进步和物质财富的丰富却导致社会均衡遭到破坏，产生了许多副作用。在电工领域这一情况也不例外，随着电工技术的飞跃发展，陆续出现很多危害影响，例如，电气和电子设备的种类及数量的增加以及电能消耗量的加大，不必要的电磁能量也随之加大，由此将伴随产生大系统的误动作；又如微波及超高压输电线的日益扩展，将对人类及动植物产生严重的影响；此外，超高层建筑和铁塔等设备将产生不必要的反射，从而出现重影问题，而汽车数量的增加将使城市杂波加大等。

尽管环境已包括了种种因素（温度、湿度、日照、气压、空气成份、水质、人口密度、城市构造、地形、经济等），电磁能量还是不能不考虑的环境因素之一，我们把它称之为电磁环境。最近国内某些文献已指出环境因素应包括温度、湿度、大气压力、太阳辐射、雨、风、水质、冰雪、灰尘与砂岩、烟雾、大气污秽、腐蚀性气体、爆炸性混合物、核辐射、霉菌、昆虫及其它有害动物、振动、冲击、地震、噪声、电磁干扰、雷电、臭氧等 20 多个因素。

当前，已进入信息化社会，人类的生存环境也已具有浓厚的电磁环境内涵，早在 1975 年专家学者就曾预言，随着城市人口的迅速增长，汽车、电子、通信、计算机与电气设备大量进入家庭，空间人为电磁能量每年增长 7%~14%，也就是说 25 年后环

境电磁能量密度最高可增加 26 倍，50 年可增加 700 倍，21 世纪电磁环境恶化已成定局。就电磁环境与人类的关系而论，除电磁环境会对人类生存产生直接影响外，电力和电子技术的进步以及社会活动的逐步发展还会对人类生活乃至人类的社会活动产生影响，因而探讨电磁环境与电工电子学的关系是极为重要的，基于这种原因，各国都已投入较多的人力物力，积极从事这方面的科研工作，多年来已陆续取得不少成果。我国由于原有工业基础比较薄弱，某些问题尚未充分暴露，矛盾还不够突出，因此某些部门对环境电磁学及电磁兼容技术的重要性的认识还很不够，目前仅有少数单位、少数人力从事这方面的科研工作，技术及物质条件都很贫乏，工作进度较慢。早在 1984 年 1 月 7 日中国科学院卢嘉锡院长在第二次全国环境保护会议闭幕会上的发言中就曾指出：“重大的环境课题必须进行多学科各部门的协作，开展综合性研究”，呼吁尽快把环境科学技术搞上去，并提出了在国家科委领导下设立环境研究中心的建议。现在我国已成立国家环境保护总局，对防止电磁危害极为关注。作为环境电磁学及电磁兼容技术的科研工作者，也应积极响应呼吁，抓紧做好这方面的工作，希望能随着第三次产业革命的迅猛发展，引起相关部门对环境电磁学及电磁兼容技术这一新兴边缘学科的重视，迅速组织力量，大力开展这一领域的科研工作，以便协调各项科学技术的发展，加速在我国实现四个现代化的步伐。

高攸纲

2001 年 3 月

目 录

1

电磁兼容学科发展历史概况

2

电磁兼容学科的研究对象

2.1	人为杂波	5
2.2	共用走廊内各种公用事业设备间的相互影响	7
2.3	重影问题	9
2.4	核电磁脉冲	9
2.5	空间飞行器的电磁兼容问题	11
2.6	电磁兼容预测	12
2.6.1	问题解决阶段	12
2.6.2	规范设计阶段	12
2.6.3	电磁兼容分析预测阶段	13
2.7	地震电磁学	14
2.8	无线电通信技术中的电磁兼容问题	15
2.9	屏蔽测量技术的发展	18
2.10	EMC 系统模型	20
2.11	自然界影响	21

2.12	频谱分配管理	22
2.13	电磁环境对人类的危害效应	23
2.13.1	射频场对人体的危害	23
2.13.2	辐射容许值标准	26
2.13.3	电磁污染的防护措施	35
2.14	计算机中的电磁兼容	38
2.14.1	计算机电磁兼容性问题综述	38
2.14.2	计算机的 TEMPEST 技术	40
2.14.3	计算机印刷电路板中的电磁兼容问题	42
2.14.4	计算机 PCB 发展新趋势	46

3

国内外有关电磁兼容的学术组织及主要学术活动

3.1	国际电工技术委员会(IEC)	47
3.2	国际无线电干扰特别委员会(CISPR)	52
3.3	国际电信联盟(ITU)	54
3.4	国际无线电咨询委员会(CCIR)	55
3.5	国际无线电科学联盟(URSI)	56
3.6	跨国电气电子工程师学会电磁兼容专业学会 (IEEE EMC-S)	57
3.7	国际电线电缆学术讨论会(IWCS)	59
3.8	国内有关 EMC 的学术组织及学术活动	60

4

电磁环境

4.1 人为辐射源	64
4.1.1 单个的技术装置	64
4.1.2 市区电磁环境	65
4.2 人工接收机	67
4.3 发展趋势	69
4.4 环境保护和电磁兼容	74

5

电磁频谱保护及国际协作

5.1 引言	77
5.2 无线电规则	81
5.3 国家级频谱保护	89
5.4 结 论	92

6

高压输电线及电气化铁道对弱电设备的干扰

6.1 强电线的特性	95
6.1.1 交流输电线	95
6.1.2 电气化铁道	98
6.2 并行回路间的电磁感应影响	100

6.2.1	产生影响的物理过程	100
6.2.2	通信线上感应电位及电流的分布规律	101
6.2.3	通信线长度等于接近长度时的电磁感应 影响	106
6.3	危险影响的计算方法	110
6.3.1	电危险影响	110
6.3.2	磁危险影响	112
6.4	干扰影响的计算	114
6.4.1	电话回路的干扰影响	116
6.4.2	电报回路的干扰影响	120
6.5	防护措施	121
6.6	阻性耦合影响及地电位	123
6.6.1	地中杂散电流场的基本理论	123
6.6.2	强电装置引起的地电位对邻近的弱电设备 及工作人员的危害影响	125
6.6.3	阻性耦合影响的防护措施	131
6.7	金属管线对低频磁场的屏蔽作用	132
6.7.1	概 说	132
6.7.2	电缆金属护套的理想屏蔽系数	134
6.7.3	电缆金属护套的实际屏蔽系数	138
6.7.4	关于地中金属管线的对地接触电阻	139
6.7.5	缆皮结构的选择	140
6.7.6	多条电缆时缆皮的理想屏蔽系数	144
6.8	架空地线的静电屏蔽作用	147
6.9	超高压线路的电场对人体组织的影响	149

7

耦合系数

7.1	电容耦合系数	156
7.2	感性耦合系数(互感系数)	160

8

雷电、磁暴及核电磁脉冲的影响

8.1	雷电的基本概念	164
8.1.1	闪电的种类	164
8.1.2	线状闪电的基本参数	166
8.2	雷电流对通信电缆线路影响的计算	167
8.3	雷击大地与邻近地下电缆可能产生的电弧长度	168
8.4	通信电缆线路的防雷措施	169
8.5	架空明线线路的防雷措施	171
8.6	磁暴的产生	173
8.7	有紫外线辐射时地球磁场的变化	176
8.8	当由太阳飞出的带电粒子辐射时地球磁场的变化	177
8.9	磁暴时地中不同地点间的电位差及电位差 对通信回路的影响	178
8.10	核电磁脉冲的影响	183
参考文献		188

1 电磁兼容学科发展历史回顾

电磁兼容来源于 Electromagnetic Compatibility (缩写 EMC) 一词。美国学者 Bernhard Keiser 曾把 EMC 定义为:“Electrical and electronic devices are said to be electromagnetically compatible when the electrical noise generated by each does not interfere with the normal performance of any of the others. Electromagnetic compatibility is that happy situation in which systems work as intended, both within themselves and in their environment.”国际电工委员会(IEC)、美国国防部《国防及有关名词字典》以及美国国家标准学会暨美国电工与电子学会联合出版的《IEEE 电工与电子学名词标准字典》都对 EMC 作了类似的定义。根据以上定义,国内不少学者多将 EMC 直译为电磁兼容,但如前言所述,EMC 学科领域范围日益扩大,现已不只限于电子设备本身,还涉及到电磁污染、电磁饥饿等一系列生态效应问题以及其他多方面的问题,“电磁兼容”一词似已不能包含 EMC 学科的全部内容。日本文献对 EMC 作了如下定义:“EMC 是一门独立的学科,随着电磁能量利用的发展,它将研究:预测并控制变化着的地球和天体周围的电磁环境、为了协调环境所采取控制方法、各项电气规程的制定以及电磁环境的协调和电磁能量的合理应用等。”正是由于本学科涉及范围很宽,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,故本学科有时也取名为环境电磁学。

谈到环境电磁学的历史,则可上溯至 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,随着电气运输的出现,在一根通信线与不对称的强电线之间有较长的平行运行,干扰问题日益严重,这样在 1887 年柏林电气协会就成立了全部干扰问题委员会,成员有赫姆霍尔兹和西门子等。紧接着英国邮电部门在 1889 年研究了通信干扰问题。美国“电世界”杂志也登载电磁感应方面的文章。20 世纪初期索末菲在这方面进行了卓越的研究。以后人们对电磁感应影响的研究日益深入,其中波拉切克、卡尔生、哈波兰德、尚德、克留威、柯列、韦特、柯斯琴科、米哈依洛夫、拉茹莫夫等学者的工作都很突出。直至今日,此类干扰问题仍为国际电信联盟(ITU)第五研究组及第六研究组在各研究期的主要研究课题。

除了上述的感性、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,但以后逐步走向正轨,各国陆续建立起相关的科研机构。在美国并早已出版有关射频干扰的专门刊物“Radio Frequency Interference”,报导了不少科研成果,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。苏联在 1948 年即已制订了“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),有很多研究单位从事抗干扰的研究。其他国家也已相继加强了射频干扰的研究工作。斯密施、摩尔、费奇、万斯、康达、迈尔、贺宾、亚诺、皮尔斯东、韦特、卡登、克里莫夫、谢昆洛夫、凯赛、格罗德涅夫、荒木庸夫、酒井洋、佐藤、赤尾等学者在这方面都有较大的贡献。目前国际上除 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,并不断地加以充实和完善,使得电磁兼容技术进入新的阶段。60 年代以来,现代科学技术向高频、高速、高灵敏度、高

安装密度、高集成度、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,正由于大规模集成电路的出现把人类带入信息时代,近年来信息高速公路和高速计算机技术成为人类社会生产和生活水平主导技术,同时也由于航空工业、航天工业、造船工业以及其他国防军事工业的需要,使得 EMC 获得空前的大发展,放眼未来,EMC 还将在信息安全和生物电磁学等方面获得较大的进展。

特别值得提出的是美俄等国正在加紧研究对付核电磁脉冲影响的方法。最近十年,美国科研部门集中力量研究保护通信网和某些军用飞机不受高空核爆炸影响的方法。美国前总统里根 1982 年在宣布美国战略部队现代化计划时说,五角大楼将大力加强它的通信系统。为此拨款近 200 亿美元,其中大部分用以对付“电磁脉冲(EMP)”的作用。欧美还有一些国家也已投入力量从事这类科研工作。

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,才能解决电磁兼容性问题。我们在长期工作中的组织管理没有投入足够的人力物力做深入的研究,这些经验往往不能很好的积累、提高和推广,形成不了设计规范,EMC 设计更多是在低水平上的重复,这种局面有待改变。

2

电磁兼容与电磁环境

如上所述,构成电磁环境的场源很多,如按频谱划分,则可粗略分为以下六类:

(1) 工频干扰(50 Hz):包括输配电以及电力牵引系统,波长为6 000 km;

(2) 甚低频干扰(30 kHz 以下):波长大于 10 km;

(3) 载频干扰:包括高压直流输电谐波干扰、交流输电谐波干扰及交流电气铁道的谐波干扰等,频谱在 10 ~ 300 kHz 之间,波长大于 1 km;

(4) 射频、视频干扰(300 kHz ~ 300 MHz):工科医疗设备(ISM)、输电线电晕放电、高压设备和电力牵引系统的火花放电以及内燃机、电动机、家用电器、照明电器等都在此范围,波长在 1 ~ 1 000 m 之间;

(5) 微波干扰(300 MHz ~ 300 GHz):包括特高频、超高频、极高频干扰,波长为 1 mm ~ 1 m;

(6) 雷电及核电磁脉冲干扰:由吉赫直至接近直流,范围很宽。

研究对象除传统设施外,涉及芯片级,直到各型舰船、航天飞机、洲际导弹,甚至整个地球的电磁环境,各种测试方法和测试标准已展开了全方位的研究,例如,VDE,FTZ,FCC,BS,MIL-STD,VG,PTB,NACSIM,IEC,CISPR,ITU-T 等标准逐年更新版本,趋向于全球公认化,各种规模的 EMC 论证、设计、测试中心如雨后春笋般地出现。各国都注重 EMC 教育和培训及学术交流,以 1994 年为例,全球就举办了 25 次国际性的一流学术交流会和培训班,涉及东道国

有美国、德国、日本、瑞士、波兰、西班牙、意大利、英国、澳大利亚、以色列等国家,研究的热点已涉及许多方面,如计算机安全;电信设备电磁兼容;无线设备、工业控制设备、自动化设备、机器人、移动通信设备、航空航天飞机、舰船、武器系统及测量设备的电磁兼容问题;各种线缆的辐射和控制;超高压输电线及交流电气铁道的电磁影响;电磁场生物效应;地震电磁现象,接地系统、滤波、屏蔽系统等。

本章将介绍电磁兼容的具体研究内容。

2.1 人为杂波

1. 输电线电晕杂波

关于输电线的杂波已有许多实测数据,基于这些数据,可以求得计算电晕杂波的实用公式。然而关于这种杂波的发生机理、发射及传播特性还不完全清楚,这方面的理论仍需继续深入探讨。

2. 汽车杂波

汽车杂波是产生甚高频(VHF)至特高频(UHF)频段城市杂波的主要原因。根据其强度和特性的测定结果,已可采取相应措施,使广播和电视的质量基本不受影响。但最近由于电子设备用于汽车控制,移动数字通信设备的运用,这个问题又被重新提出。

斯坦福研究所(SRI)对点火系统发射杂波的主要部件——点火栓、配电器接点等——进行了改进,使处于 30 ~ 500 MHz 频段的杂波降低了 13 ~ 20 dB。此外还有人求出 6 引擎发动机各点火栓的脉冲杂波振幅分布。对配电器的情况,若电极间隙从 0.27 mm 增至 2.39 mm,则杂波可下降 10 dB。若在负荷电极上增加银接点,或用金属合金覆盖,也可降低杂波。点火系统以外的汽车电装置也能发出杂波,其特征正在测试研究中。