

电磁兼容及防护技术系列专著

电磁环境 模拟技术

DIANCI HUANJING
MONI JISHU

范丽思 崔耀中 编著



國防工業出版社

National Defense Industry Press

电磁环境模拟技术

范丽思 崔耀中 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书内容共 10 章,分为 3 个部分:基础知识部分介绍了电磁环境的构成、传输线和天线的基础知识。连续波模拟部分重点介绍了开阔场、电波暗室、GTEM 室和混响室电磁环境模拟技术等。电磁脉冲模拟部分介绍了雷电电磁脉冲模拟、核电磁脉冲模拟与超宽带等。

本书读者为从事电磁兼容测试、电磁环境模拟和电磁脉冲测试的技术人员,也可作为相关专业研究生教材。

图书在版编目 (C I P) 数据

电磁环境模拟技术/范丽思,崔耀中编著. —北京:
国防工业出版社, 2012. 1
ISBN 978-7-118-06966-2

I. ①电… II. ①范… ②崔… III. ①电磁环境—环
境模拟 IV. ①X21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 113398 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 100048)

军械工程学院印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 10³/₄ 字数 268 千字

2012 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 25.00 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

随着科学技术的迅猛发展,电气电子设备和通信设备数量正在急剧攀升,人们无时无刻不生活在复杂的电磁环境中。特别是高技术军事领域中的广泛应用,任何军事行动都处在一定的电磁环境中。现代化武器装备的效能发挥,强烈地依赖于战场的电磁环境。在现代战场上,武器装备的生存力及战斗力都与其防电磁危害的能力紧密相联。因此,世界各国都十分重视武器装备的抗强电磁干扰能力。

在电磁环境日趋恶化的今天,用传统的电磁兼容测试方法已经不能实现电磁环境的模拟与再现。电磁环境模拟技术正是针对这一问题提出的一种新的测试技术。电磁环境模拟技术作为一门综合性学科,其基础理论涉及电磁场理论、微波与天线理论和电路基础,起源于电磁兼容测试技术,但模拟方法不局限于电磁兼容测试,其模拟电磁环境强度高于电磁兼容测试标准要求。电磁环境模拟技术的终极目标是模拟电气电子设备所处的真实电磁环境,以用于考核电子设备在复杂电磁环境的生存能力。

鉴于此,我们编著了《电磁环境模拟技术》一书,目前,此类图书多侧重于按照电磁兼容标准与要求进行标准化测试,而本书所述内容高于相关标准要求。本书基础知识部分介绍了该书用到的一些基本理论,第1章介绍了复杂电磁环境的构成与危害;第2章介绍了传输线基本理论和电磁环境模拟中常用的传输线如有界波模拟器、GTEM室等;第3章介绍了天线理论和电磁环境模拟与测试中常用的天线。在连续波模拟部分主要介绍了开阔场、电波暗室、GTEM室和混响室。电磁脉冲模拟部分主要介绍了雷电与核电磁脉冲模拟、超宽带等内容。

在内容上本书不看重复公式的推导过程,而重在深入浅出地介绍强电磁环境场模拟的机理。既可供从事电磁兼容测试、电磁环境模拟和电磁脉冲测试工作的工程技术人员参考,又可作为高等院校相关专业研究生教材。

感谢魏光辉教授、潘晓东老师和周星老师,在本书编写过程中他们提出了宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中错误及不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者
2010年10月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 电磁环境的基本概念与构成	2
1.2.1 电磁环境的基本概念	2
1.2.2 电磁环境的构成	3
1.3 高技术条件下的战场电磁环境及其特点	5
1.3.1 现代战场电磁环境	5
1.3.2 复杂电磁环境的特点	6
第2章 传输线的基本理论	7
2.1 传输线方程及其解	8
2.1.1 长线的分布参数	8
2.1.2 传输线方程	9
2.1.3 均匀传输线方程的定解	12
2.2 传输线的特征参数	13
2.2.1 传播常数	13
2.2.2 特性阻抗	14
2.2.3 输入阻抗	15
2.2.4 反射系数	16
2.2.5 驻波比	17
2.3 传输线的工作状态	17
2.3.1 行波状态	17
2.3.2 驻波状态	18
2.3.3 行驻波状态	18
2.4 电磁环境模拟中常用传输线	18
2.4.1 同轴线	18
2.4.2 双平行板结构	19
2.4.3 GTEM 室	20
2.5 小结	20
第3章 天线基础	21
3.1 电磁辐射的基本理论	21
3.1.1 电流元的辐射场	21
3.1.2 电流元的方向性	23
3.1.3 电流元的辐射功率	23

3.1.4	电流元的辐射电阻	24
3.2	天线的基本参数	24
3.2.1	天线方向性	24
3.2.2	天线的阻抗特性	26
3.2.3	天线的极化	27
3.2.4	天线的频率参数	28
3.2.5	天线系数	28
3.3	电磁兼容试验常用天线和选择原则	29
3.3.1	测试天线选用原则	29
3.3.2	电磁环境模拟常用天线	30
3.4	小结	33
第4章	开阔试验场地	34
4.1	对开阔试验场地的要求	34
4.1.1	面积	34
4.1.2	环境条件	35
4.1.3	反射地面	35
4.1.4	地形粗糙度	36
4.1.5	试验辅助设备	37
4.1.6	测试仪器的安置	37
4.2	归一化场地衰减	37
4.2.1	理想归一化场地衰减计算	37
4.2.2	归一化场地衰减的测量	42
4.3	天线系数测量	45
4.3.1	两天线法	45
4.3.2	三天线法	46
4.3.3	标准场地法	47
4.4	开阔试验场地测试	48
4.4.1	辐射发射测试	48
4.4.2	辐射敏感度测试	49
4.5	测试误差	49
4.6	开阔试验场使用的局限性	49
第5章	电波暗室	51
5.1	电波暗室与主要技术指标	51
5.1.1	电波暗室分类	51
5.1.2	电波暗室的结构和吸波材料	52
5.1.3	电波暗室的主要技术指标	53
5.2	电波暗室的性能校验	56
5.2.1	屏蔽性能的校验	56
5.2.2	归一化场地衰减	63

5.2.3	场地均匀性的校验	65
5.3	电波暗室测试	66
5.3.1	电波暗室辐射抗扰度试验	66
5.3.2	辐射发射测试	68
5.4	测试误差的来源	70
5.4.1	暗室性能影响	71
5.4.2	场强测量误差	71
5.4.3	标准实验室配置	71
5.5	小结	71
第6章	GTEM 横电磁波传输室	73
6.1	GTEM 室概述	73
6.2	基本结构与原理	73
6.2.1	GTEM 基本结构	73
6.2.2	GTEM 室终端匹配负载	73
6.2.3	GTEM 室工作原理	75
6.3	GTEM 室的基本参数和性能测试	76
6.3.1	特性阻抗	76
6.3.2	场分布	77
6.3.3	时域的阻抗特性测试与驻波比	79
6.3.4	屏蔽效能测试	80
6.4	使用 GTEM 室进行测试	80
6.4.1	辐射发射测试	80
6.4.2	辐射抗扰度试验	82
6.5	小结	83
第7章	混响室	85
7.1	混响室工作原理及主要技术指标	85
7.1.1	混响室基本结构	85
7.1.2	混响室主要特点	87
7.1.3	混响室主要技术参数	87
7.2	混响室的校准	90
7.2.1	空腔室校准	90
7.2.2	腔室最大加载校验	94
7.2.3	EUT 在内时的快速校验	94
7.3	应用混响室进行测试	95
7.3.1	辐射抗扰度测试	95
7.3.2	辐射发射测量	96
7.3.3	屏蔽效能的混响室测量法	97
7.4	其他混响室方案	98
7.5	混响室的局限性	99

第 8 章 雷电电磁脉冲模拟技术	101
8.1 闪电的物理过程	102
8.1.1 雷云中的电荷分布	102
8.1.2 雷云的起电机理	103
8.1.3 雷雨云放电过程	105
8.2 雷电电磁脉冲特征参数	107
8.2.1 雷电流的特征参数	107
8.2.2 雷电电磁脉冲频谱	110
8.2.3 雷电场	110
8.3 雷电电磁环境模拟	113
8.3.1 雷击浪涌试验	113
8.3.2 脉冲磁场抗扰度试验	117
8.3.3 雷电电磁脉冲电场模拟	121
8.4 小结	126
第 9 章 核电磁脉冲模拟	127
9.1 核电磁脉冲的产生机理	127
9.2 核电磁脉冲环境	131
9.2.1 HEMP 波形	131
9.2.2 核电磁脉冲环境	132
9.2.3 核电磁脉冲特点	133
9.3 核电磁脉冲模拟技术	133
9.3.1 国内外典型模拟器	133
9.3.2 核电磁脉冲模拟器分类	135
9.3.3 核电磁脉冲模拟器工作原理	137
9.3.4 Marx 发生器	141
9.3.5 有界波传输装置	143
9.4 核电磁脉冲测试测量技术	146
9.4.1 电流传感器	146
9.4.2 磁场传感器	149
9.4.3 电场传感器	150
9.4.4 测试传输系统	150
9.5 小结	153
第 10 章 超宽带电磁脉冲模拟	154
10.1 国外电磁脉冲武器发展状况及其特点	154
10.1.1 国外电磁脉冲武器发展状况	154
10.1.2 电磁脉冲武器的特点	155
10.2 电磁脉冲武器的工作原理	156
10.2.1 磁通压缩发生器	156
10.2.2 虚拟阴极振荡器	157

10.3 超宽谱电磁脉冲模拟.....	158
10.3.1 Telsa 变压器	158
10.3.2 同轴 Blumlein 线.....	159
10.3.3 Peaking – Chopping 开关	160
10.4 小结.....	160
参考文献.....	161

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

随着微电子技术的发展, 半导体集成电路的集成度不断提高、功耗逐渐降低, 导致电子设备对电磁脉冲越来越敏感, 由电磁脉冲危害造成的损失呈现逐年上升之势, 仅静电放电产生的电磁脉冲在微电子技术领域造成的损失, 全球每年就高达数百亿美元。电磁脉冲不仅可以造成电子设备的严重干扰和损坏, 还可能使电子器件产生潜在性失效, 降低电子设备的工作可靠性, 引发重大工程事故。由于潜在性失效具有隐蔽性, 目前的实验手段难以检测, 因此, 对卫星、海底电缆通信系统等无法维修的复杂系统危害性极大, 国内外报道的由电磁脉冲导致卫星失控、火箭发射失败、飞机失事等恶性事故屡见不鲜。

随着电气化、网络化时代的到来, 电磁脉冲的危害已成为保障国民经济发展的重点研究课题。电磁脉冲的影响范围包括各级行政中心(政府设施、微波及卫星通信系统)、道路/铁路信号系统、交通/通信基础设施、广播电视系统、移动通信、电脑网络等。此类问题近年来在国内时有发生: 1998 年 2 月春运期间, 广州白云机场电台受到干扰, 空中航线被迫关闭 5h, 造成多次航班延误, 大量旅客滞留; 1998 年 6 月, 深圳证券卫星通信网使用的亚太 1 号卫星受到不明电磁干扰, 导致其不能正常工作。在国外, 类似报道也很多, 例如, 美国“北美防空计算机系统”曾两次被电磁干扰误触发, 发出外来袭击美国的紧急警报, 造成一场虚惊。

在高新技术战争中, 电磁脉冲武器将是对重要民用设施和军事目标威胁和破坏力最大的武器之一, 而我国对电磁防护的研究始终停留在电磁兼容的概念范畴内, 尚未对电磁脉冲防护给予足够重视, 至今, 我国绝大多数军用和民用电子设备未采取电磁脉冲防护措施, 更无任何强制性出厂检验标准和设施。一旦政府机构、金融中心、通信网络、广播电视等关系国民经济的重要电子系统受到敌方强电磁脉冲打击, 将会出现大范围瘫痪, 造成指挥失控, 给民众带来巨大的心理压力和恐慌, 后果不堪设想。

在平时时期, 各种自然和人为电磁脉冲的危害也不容忽视, 例如, 全球每年因雷电电磁脉冲导致信息系统瘫痪等事故频繁发生, 从卫星通信、导航、计算机网络乃至家用电器都会受到雷电灾害的严重威胁, 仅上海市 1999 年由于雷电所造成的损失就超过 2 亿元。随着我国加入世界贸易组织, 电子产品的检测标准必须与国际接轨, 对电子产品抗电磁脉冲能力的要求大大提高, 迫切需提高国产电子产品抗电磁脉冲的性能, 这对促进国际贸易, 实现世界贸易组织有关消除技术壁垒的要求, 增强我国经济实力都是至关重要的。因此, 研究电磁脉冲防护技术, 是当前国民经济和社会发展中急需解决的重大科技问题之一。

1.2 电磁环境的基本概念与构成

1.2.1 电磁环境的基本概念

1. 电磁环境

电磁环境(Electromagnetic Environment)是指存在于给定场所的所有电磁现象的总和。电磁环境通常与时间有关,它的描述可能需要用到统计的方法。“给定场所”指特定空间范围,“所有电磁现象”是指包括了在这个空间或环境当中,在任何时候所遇到的任何电磁现象。

2. 电磁骚扰

电磁骚扰(Electromagnetic Disturbance)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。

“电磁骚扰”包括了电磁噪声、无用信号或者传播媒介自身的变化。

3. 电磁干扰

电磁干扰(Electromagnetic Interference, EMI)是指电磁骚扰引起的装置、设备或系统性能降低。

从上面两个术语来看,“骚扰”与“干扰”是有明确区别的,电磁骚扰仅仅是一种电磁现象,它可能引起装置、设备或系统的性能降级或损害,但不一定已经造成了后果。而电磁干扰则是由电磁骚扰引起的直接结果。由此可见,“骚扰”与“干扰”分别是造成性能降级的原因和后果,两者不能混为一谈。在过去对这两个名词并没有赋予明确的、概念上的区分,只是进入20世纪90年代以后,国际电工委员会(IEC)才明确引入Disturbance一词,与过去沿用的Interference分开。

4. 电磁噪声

电磁噪声(Electromagnetic Noise)是指不带任何信息,即与任何信号都无关的一种电磁现象。电磁噪声的来源有自然界、机电设备或其他人为装置。电子噪声通常是脉动的,但也可以是周期性的。

5. 无用信号

无用信号(Unwanted Signal)指对有用信号接收可能产生损害作用的信号。

6. 电磁脉冲

核爆炸或雷电放电时,在核设施或周围介质中存在光子散射,由此产生的康普顿反冲电子和光电子所导致新的电磁辐射。由电磁脉冲(Electromagnetic Pulse, EMP)所产生的电场、磁场可能会与电力或电子系统耦合产生破坏性的电压和电流浪涌。

7. 雷电电磁脉冲

雷电电磁脉冲(Lightning Electromagnetic Pulse, LEMP)指与雷电放电相关的电磁辐射,由它所产生的电场和磁场可能与电力、电子系统耦合产生破坏性的电流浪涌和电压浪涌。

8. 核电磁脉冲

核电磁脉冲(Nuclear Electromagnetic Pulse, NEMP)指核爆炸使得核设施或周围介质中存在光子散射,由此产生的康普顿反冲电子和光电子导致的电磁辐射。该电磁场可与电力、电子系统耦合产生破坏性电压和电流浪涌。

9. 高空电磁脉冲

高空电磁脉冲(High altitude Electromagnetic Pulse, HEMP)指大气外层的核爆炸所产生的电磁脉冲。

1.2.2 电磁环境的构成

电磁环境是指存在于给定空间所有电磁现象的总和，一般说来，电磁环境依据干扰的来源分类，电磁环境可以分为自然环境因素和人为环境因素。一般情况下，构成电磁环境的各种因素可用图 1-1 表示。

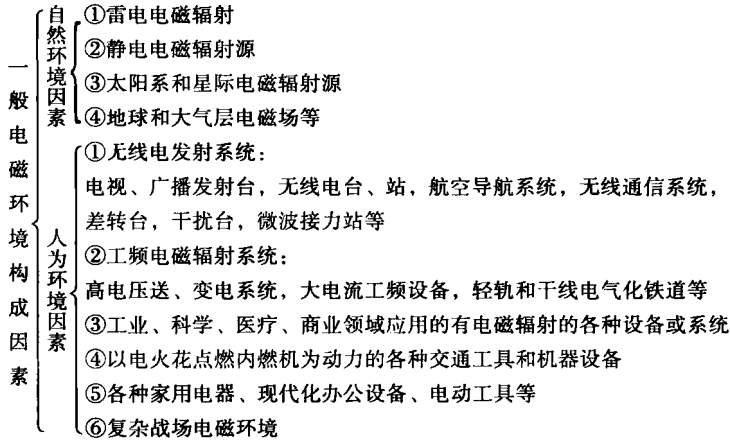


图 1-1 电磁环境的构成因素

1. 自然电磁环境

自然环境因素有雷电、静电形成的电磁辐射和太阳系、星际的电磁辐射以及地球和大气中的电磁场等。此类天电噪声、宇宙噪声、沉积静电噪声既是地球电磁环境基本要素的组成部分，又是对无线电通信、空间技术造成干扰的干扰源，因此称为自然电磁骚扰源。

自然电磁骚扰源主要分为宇宙干扰、大气干扰、热噪声和沉积静电干扰。从太阳、月亮、恒星、行星和星系发出的宇宙干扰是来自太阳系、银河系的电磁骚扰。宇宙干扰包括太空背景噪声、太阳无线电噪声以及月亮、木星和仙后座等发射的无线电噪声。太空背景噪声是由电离层和各种射线组成的。太阳无线电噪声则随着太阳的活动，特别是太阳黑子的发生而显著增加。太阳的干扰频率从 10MHz 到几十吉赫兹。太阳黑子会导致地球表面的磁暴。在磁暴期间，地球不同地点的地电位会出现变化，并且也会在通信线路中感应电磁噪声。太阳黑子的大量出现也会影响到电离层，从而可能会干扰短波的传播。宇宙干扰在 20MHz ~ 500MHz 的频率范围内表现相当明显。其干扰的主要对象是通过卫星传送的通信和广播信号、航天飞行器等。

大气干扰主要是由夏季本地雷电和冬季热带地区雷电所产生。地球上平均每秒钟发生 100 次左右的雷击放电。雷电是一连串的干扰脉冲，其电磁发射借助电离层的传输可传播到几千公里以外的地方。大气干扰的频谱主要在 30MHz 以下，对地球上 20MHz 以下的无线电通信影响很大。大气层中的其他自然现象(沙暴、雨雾等)也会形成较强烈的电磁噪声源。

热噪声是指处于一定热力学状态下的导体中所出现的无规则电起伏，它是由导体中自由电子的无规则运动引起的。例如电阻热噪声、气体放电噪声、有源器件的散弹噪声。

沉积静电干扰是指大气中的尘埃、雨点、雪花、冰雹等微粒在高速通过飞机、飞船表面时，由于相对摩擦运动而产生电荷迁移从而沉积静电，当电势升高到 1000kV 时，就发生火花放电、电晕放电。这种放电产生的宽带射频噪声频谱分布在几赫兹到几千赫兹的范围内，严重影响高频、甚高频和超高频频段的无线电通信和导航。

2. 人为电磁环境

人为环境因素包括各种人为干扰源产生的电磁辐射，如电视、广播发射台，无线电台、站，航空导航系统，雷达系统，移动通信系统，工频高电压送、变电系统，大电流工频设备和轻轨、干线电气化铁路系统，一切以电磁能应用进行工作的工业、科学、医疗、商用和军用的电磁辐射设备以及电火花点燃内燃机为动力的各种机器、车辆、船舶及各种家用电器、现代化办公设备、电动工具等。这些设备和系统都会产生不同频率、不同强度的电磁辐射，其中，大部分是电磁脉冲辐射。一般情况下，人为电磁环境比自然干扰源产生的自然电磁环境的强度大，对电磁环境的影响严重，所以这里重点介绍以下人为电磁骚扰源。

1) 无线电发射设备

通信、广播、电视、雷达、导航等大功率无线电发射设备发射的电磁能量都是带有信息的，对于其本身的系统来说是有用信号，而对其他系统就可能成为无用信号而造成干扰，并且其强功率也可能对其周围的生物体产生危害。大功率的中、短波广播电台或通信发射台的功率达数十千瓦、甚至数百千瓦。这些大功率发射设备的载波均经过合法指配，一般不会形成电磁骚扰源。但是，一台发射机除了发射工作频带内的基波信号外，还伴随有谐波信号发射和非谐波信号发射，它们将对有限的频谱资源产生污染。

2) 工频电磁辐射系统

作为电磁骚扰源的高压电力系统包括架空高压送电线路与高压设备，导线或其他金属配件表面对空气的电晕放电、绝缘子的非正常放电和接触不良处的火花都会产生较强的电磁辐射。

电牵引系统包括电气化铁路、轻轨铁道、城市有轨与无轨电车等，它们的共同特点是从线路上获取电流，而不是自身携带电源。它们的导电装置的跳动、抖动会产生周期性的随机脉冲骚扰，一方面脉冲电流沿导线进入电网形成传导干扰，另一方面向空间发射电磁波。

3) 工业、科学、医疗设备

工业、科学、医疗设备 (ISM) 是指有意产生无线电频率的电磁能量，对其加以利用并不希望发射的设备。

工业设备中的射频 (RF) 氩弧焊机、射频加热器等是较强的人为电磁骚扰源。典型的氩弧焊是应用基本频率为 2.6MHz 的射频电弧进行焊接，其频率范围覆盖了 3kHz ~ 120MHz，射频 (RF) 氩弧焊是一种较强的人为电磁骚扰源，它对无线电接收机的产生强烈的电磁干扰效应。

用于科学研究的射频设备在我国不是主要的电磁骚扰源。

随着科学技术的发展，医疗射频设备逐渐成为一个重要的电磁骚扰源，医院内的电磁干扰问题与日俱增。主要的电磁骚扰源包括从短波到微波的各种电疗设备、外科用高频手术刀等。

4) 内燃机点火系统

发动机点火系统是最强的宽带干扰源之一。其产生干扰的最主要原因是电流的突变和电弧现象。点火时产生的波形前沿陡峭的火花电流脉冲群和电弧，火花电流峰值可达几千安培，并且具有振荡性质，振荡频率为 20kHz ~ 1MHz，其频谱包括基波及其谐波。点火骚扰的干扰场对环境影响很大。

5) 家用电器、电动工具与电气照明

这是一批种类繁多、骚扰源特性复杂的一大类装置或设备。按其产生电磁骚扰的原因，大致可以将这类设备划分如下：

(1) 由于频繁开关动作而产生的所谓“喀喇声”骚扰。这是一类在时域上有明确定义的电磁噪声。这一类设备有电冰箱、洗衣机等。

(2) 带有换向器的电动机旋转时，由电刷与换向器间的火花形成的电磁骚扰源设备。如电钻、电动剃须刀等。

(3) 可能引起低压电网各项指标下降的骚扰源。如空调机、感性负载等。

(4) 各种气体放电灯。如荧光灯等。

6) 复杂战场电磁环境

由于电子设备和信息化武器装备的普及使用，现代战场上电磁辐射源及电磁信号变得密集，电磁波源多样，电磁辐射信号种类繁多，导致电磁环境趋于复杂。从空间角度讲，电磁波可以来自地面、海上、空中或太空。从敌我属性来讲，电磁波可以来自敌方的电子设备，也可能来自己方的电子设备，还可能来自非敌我双方所属的电子设备和自然界。从辐射源种类讲，电磁波可能来自通信、雷达、导航、制导、计算机、广播和电磁设备。

特别是电磁脉冲武器的出现改变了现代战场的电磁环境态势，电磁脉冲武器的作战对象主要是敌方的指挥、通信、信息及武器系统，它能够对较大范围内的敌方各种电子设备的内部关键部件同时实施压制性和摧毁性的杀伤，所以，它是一种性能独特、威力强大、软硬杀伤兼备的信息化作战电磁脉冲武器，将对电子战的作战方式带来革命性的影响，是一种能大量摧毁敌方武器系统并将使作战方式发生革命性变化的新一代武器，是一种可用来控制未来战场，并成为核威慑条件下信息战的杀手锏武器。

1.3 高技术条件下的战场电磁环境及其特点

1.3.1 现代战场电磁环境

现代战场的电磁环境是各种电磁能量共同作用的复合环境，既有自然电磁干扰源，如雷电、静电等，又有强烈的人为干扰源，如各种新概念电磁武器。高技术条件下的战场电磁环境效应主要由各类电磁脉冲场构成，如图 1-2 所示。

信息化战场上在交战双方激烈对抗条件下所产生的多类型、全频谱、高密度的电磁辐射信号以及己方大量使用电子设备引起的相互影响和干扰，从而造成在时域上突发多变、空域上纵横交错、频域上拥挤重叠，严重影响武器装备效能、作战指挥和部队作战行动的无形战场环境。构成复杂电磁环境的主要因素有敌我双方的电子对抗，各种武器装备所释放的电磁波，民用电磁设备的辐射以及自然界产生的电磁现象和中立方电磁辐射源发出的电磁波等构

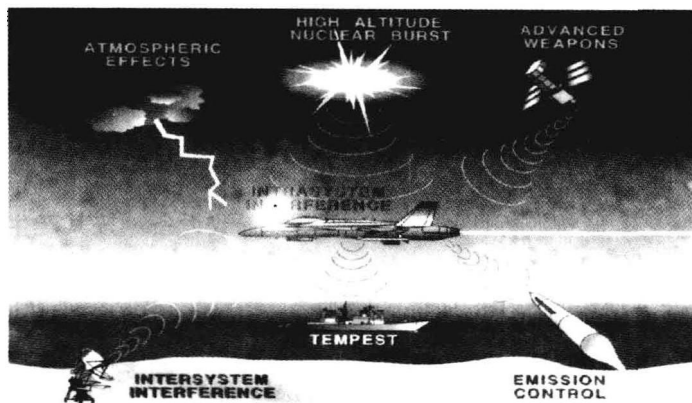


图 1-2 现代战场电磁环境

成了复杂电磁环境的主题。再加上高能微波武器等定向能武器和电磁脉冲弹及超宽带、强电磁辐射干扰机的出现，使战场的电磁环境越来越复杂。

1.3.2 复杂电磁环境的特点

制信息权实质是制电磁权，必须提高复杂电磁环境下的作战能力。复杂电磁环境具有以下特点：

(1) 种类上的多样性。由复杂电磁环境的定义可以看出，构成复杂电磁环境的因素包括敌我双方进行有意对抗干扰时释放的电磁波及电子设备产生的电磁能量，还有一种施放箔条的无源干扰(类似云雨杂波干扰)，民用电磁辐射以及自然产生的电磁现象等。

(2) 信号形式多样。随着电子信息技术的飞速发展，各种新体制雷达、通信等电子设备上使用了更加复杂的信号形式。在目前世界上的通信信号种类多达 100 种以上。各种复杂信号的使用增加了电磁环境的复杂性。

(3) 空间上的交织性。交织性是指在敌我双方相互争夺和使用的电磁空间里，双方的电磁信号都相互交织在一起，这种交织性是由于电磁频谱独特的物理特性所形成的。主要表现在电磁活动在空域上的纵横交叉、时域上的连续交错、频域上的密集重叠和能域上的强弱参差。

(4) 频谱宽广重叠。由于电子信息技术的飞速发展和电子信息装备的大量使用，战场上电磁信号所占频谱越来越宽，几乎覆盖了全部电磁信号频段。

(5) 能量密度不均。由于电磁波在空间传播过程中受到各种传播因素的影响以及作战双方电磁攻击目标位置的不同，使得战场空间电磁能量很不均匀，有些地方能量集中，有些地方能量分散。

第 2 章 传输线的基本理论

在电磁学和微波科学技术的研究中，传输线理论具有基础性和极大的重要性。传输线是能量和信息的载体及传播工具，而且是构成各种高频、微波元件和仪器的基础。

各种传输线在电磁环境模拟方面得到了广泛应用。如图 2-1 所示的同轴线和微带线等传输线，广泛应用于电磁环境测量。如图 2-2 所示的平行板传输线、TEM 室和 GTEM 室广泛应用于电磁环境形成过程，其本质上是一种同轴结构的传输线。

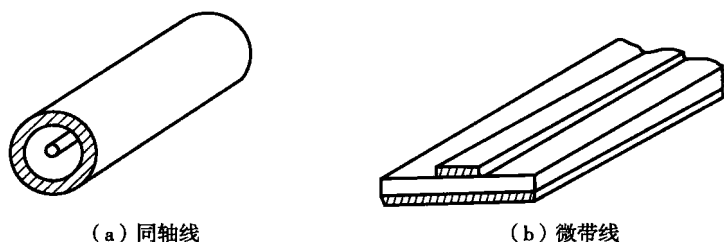


图 2-1 同轴线和微带线

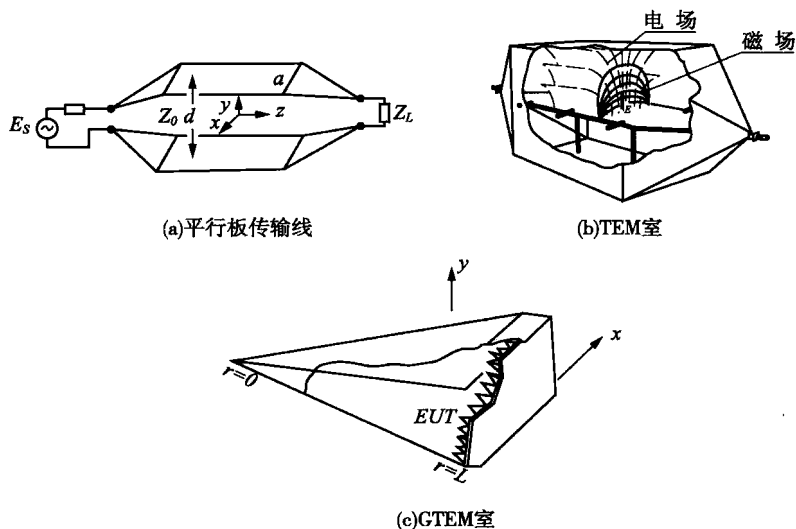


图 2-2 平行板传输线、TEM 室和 GTEM 室

2.1 传输线方程及其解

通常人们把 TEM 波传输线称为长线，这是由于微波的波长很短，而传输线的长度往往比波长长许多或与波长相当的缘故。例如在电力工程中，对于频率为 50Hz、波长为 6000km 的交流电，1000m 的输电线仍远远小于波长，故视为短线；而对于 1000MHz 的电磁波，其波长为 30cm，1m 长的传输线远大于波长，故为长线，所以长线是相对波长而言的。凡是线长度比波长长或与波长相当的传输线就称为长线。一般来讲，微波传输线基本上可视为长线。

对传输线的分析方法有两种：一种是采用“场”的方法，从麦克斯韦方程出发，求解满足边界条件的波动方程解，得出传输线上电场和磁场的表达式。但是“场”求解方法在数学上比较烦琐，甚至边界条件复杂不可能求出解析解。另一种方法是采用“路”的方法，从传输线方程出发，求解满足边界条件的电压和电流波动方程解。本节介绍均匀传输线从“路”的观点研究传输线在微波运用下的传输特性，所讨论的内容为均匀长线。

2.1.1 长线的分布参数

若长线的分布参数沿线是均匀的，不随位置而变化，则称为均匀长线或均匀传输线。本章只限于分析均匀长线，但其基本概念也适用于非均匀长线，而非均匀长线通常用数值方法近似求解。

在低频电路中，通常忽略元器件的分布参数效应。而在微波频段，分布参数影响非常明显，不可忽略。

以平行双导线为例，随着信号频率的升高，达到微波频段之后，高频电流流过导线时有趋肤效应，引起电阻增大，沿线各处均有损耗，因而导线存在分布电阻 R ；当导线间介质不是理想介质时存在漏电流，因而存在分布电导 G ；另外高频电流流过导线时周围会产生高频磁场，于是导线存在分布电感 L ；两导线间存在电压，就会产生高频电场，导线间存在分布电容 C ，这样，根据上述分析可以将平行双导线等效为如图 2-3 所示电路。

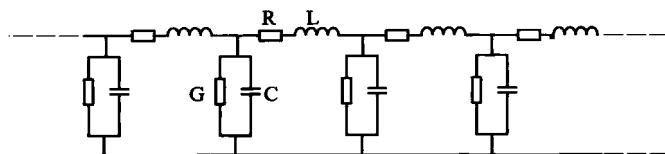


图 2-3 传输线等效电路

常用 R 、 G 、 L 、 C 来分别表示单位长度上的分布电阻、分布电导、分布电感和分布电容，它们统称为传输线上的分布参数。表 2-1 列出了常见传输线上 R 、 G 、 L 、 C 的计算公式。