

# 电子工程师手册

ELECTRONICS ENGINEERS' HANDBOOK

上册

## 第 7 篇 微波技术、天线与电波传播

主 编 林杞楠

执 笔 林杞楠

丁荣林

王延恒

主 审 言 华

# 电子工程师手册

电子工程师手册编辑委员会 编

下 册



机械工业出版社

(京)新登字054号

本手册系统地概括了电子技术基础及其应用领域的主要技术内容，有一定的深度和广度。

全书按其内容，大体上可分为如下三个部分：

1. 基础知识部分，包括：常用符号、物理化学常数、单位、标准和数学公式；电磁学与电路基础；信号与系统分析等。
2. 技术基础部分，包括：电子材料；电子元器件；模拟电路；数字电路；微波、电波传播与天线；电子产品的工艺、结构、电磁兼容与可靠性。
3. 技术应用部分，包括：电力电子技术；电子测量与电子仪器；机械量的电子测量；电子计算机与人工智能；自动控制系统与控制仪表；数控技术与机器人；广播、电视与声像处理技术；通信、雷达、导航与电子对抗；医疗电子技术。

本书在编写上，力求简明扼要、深入浅出、直观易懂、归类便查。注意理论阐述的严谨和采用数据、图表和公式的准确可靠。努力做到既反映我国电子技术近年来的主要成就，也介绍国外的先进技术和发展动向。

本手册主要供机电工业系统和其他行业系统的工程技术人员在处理专业工作中涉及电子技术问题时查阅使用，也可供大专院校有关专业师生参考。

## 电子工程师手册

电子工程师手册编辑委员会 编

责任编辑：贾 馨 版式设计：霍永明  
封面设计：姚 毅 责任校对：肖新民  
责任印制：路 琳

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码：100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京房山区印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·印张 182<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·插页 8·字数 5756 千字

1995年4月北京第1版·1995年4月北京第1次印刷

印数 00,001—10 000 定价：上、下册共198.00元

ISBN 7-111-04178-X/TM·523

发展电子技术促  
进经济繁荣与社  
会进步

孙俊人

一九八二年六月

中国电子学会理事长孙俊人为本书题词

# 电子工程师手册编委会

主任委员	吴咏诗					
副主任委员	胡健栋	邹洵	罗命钧(常务)			
委员	翁瑞琪(常务)	秦起佑(常务)	张长生			
	黄仕机	周孝琪	闾石	俞斯乐	丁润涛	
	郭维廉	徐苓安	张国雄	朱梦周		
总编辑	吴咏诗					
副总编辑	秦起佑	翁瑞琪				
秘书	尹明丽					

## 序

电子技术是一门发展迅速，应用广泛的技术。它的发展可以说是日新月异，新技术层出不穷。它的应用则已遍及工业、农业、国防、科技、文教和人民日常生活的各个领域，对于经济发展和社会进步有着重要的促进作用。当前第三次新的技术革命正在兴起，如果说第一次技术革命是以机械化为标志，第二次技术革命是以电气化为标志的话，那么，第三次新的技术革命就应该说是以电子化作为标志。前两次技术革命主要都是人类体能的延伸，而第三次新的技术革命则主要是人类智能的扩展，其基础就是电子技术。也有人说目前已是信息时代，而信息的获取、处理、传输也是要依赖于电子技术的。所以为了加速我国的现代化建设，体现“科学技术是第一生产力”的伟大作用，在各个领域，尤其是机电工业系统中推广与普及电子技术是十分重要的。在这种情况下，编写和出版这部《电子工程师手册》是很有必要的。

这部手册是为机电工业系统和其他行业系统中具有中等以上技术水平的工程技术人员在处理专业工作中涉及电子技术问题时查阅而编写的，是以应用为主的、综合性的电子技术手册。它是一部工具书，主要为工程技术人员在研究、处理电子技术问题时起备查、提示和启发的作用。它也可作为高等学校有关专业师生及其他有关人员提供参考。

这部手册系统地概括了电子技术及其主要应用领域的基本技术内容。在内容取舍上力求做到：科学性、实用性和先进性。科学性是要体现现代电子科学技术的基本内容，介绍必要的基础知识，注意理论阐述的严谨，采用数据、图表的准确可靠；实用性是要从实用出发建立自己的体系，主要提供一些结论性的技术内容以及这些结论的应用，在编写上简明扼要，深入浅出，直观易懂，归类便查；先进性则是既要反映我国电子技术近年的主要成就，也要介绍国外的先进技术和发展动向，注意反映电子技术的时代特征。

整个手册共17篇，按其内容大体上可分为以下三个部分：

(1) 基础知识 共2篇，分别是：常用资料（符号、常数、单位、标准和数学公式）；电磁学与电路基础。

(2) 技术基础 共6篇，分别是：电子材料；电子元器件；模拟电路；数字电路；微波技术、电波传播与天线；电子产品的工艺、结构与可靠性。

(3) 技术应用 共9篇，分别是：电力电子技术；电子测量与电子仪器；机械量的电子测量；电子计算机；自动控制与控制仪表，电子技术在机械制造方面的应用；广播、电视与声像技术；通信、雷达、导航与电子对抗；医疗电子技术。

这部手册的编写方式也是一种改革的尝试。过去一部综合性手册的编写一般是组织全国各地的有关专家分头编写，然后集中统稿编辑的。由于专家分散在全国各地，联系讨论不便，统稿、编辑过程中也要往返于各地进行讨论、修改，这就不能不拖延时日，往往要5~6年，大型的甚至要8~10年才能出版。电子技术发展非常迅速，如果从编写到出版要花这样长的时间，那么，手册出版之日可能已是内容陈旧之时。因此，这部手册是主要聘请天

津、北京两地的有关专家编写、审稿，而且由机械工业出版社委托天津大学承担了具体的组织工作。由于编写人员居住相对集中，便于交流与讨论，主编与主审也能及时交换意见，除出版社外，还有一个专业面较宽的学术单位负责组织工作，这就使整个手册的编写、审稿和定稿工作在两年之内顺利完成，而且保证了质量，基本上达到了预定的目标和要求。应该说这种做法是成功的，不足之处则可能是未能充分反映其他各地有关专家的经验与成就，这就希望各位专家和广大读者对本手册多提宝贵意见，以便今后能予以修改和补充。

这部手册能以顺利地完 成和出版，我愿诚挚地感谢编委会各位委员、各篇的主编、主审以及全体编者所付出的辛勤劳动，感谢他们认真负责的态度和友好合作的精神。我还要特别感谢机械工业出版社的罗命钧、秦起佑、贾馨三位同志和天津大学的翁瑞琪教授，他们为本手册的组织编写、统稿定稿、编辑出版做了大量的工作，为保证手册的质量做出了重要的贡献。

我希望，这部手册的出版，能为有关专业的工程技术人员和高等学校的师生，在从事电子技术应用与推广工作中提供一本实用的工具书。如果它能为我国电子技术的广泛应用起到一些促进作用的话，这将使我们所有这些参加手册编写、出版工作的同志感到荣幸和欣慰。

吴咏诗



# 目 录

## 第 1 章 概 论

- 1 电磁波谱.....7-1
- 2 天线发射原理.....7-2
- 3 无线电波传播方式.....7-3
- 4 时变电磁场的基本关系.....7-4
- 5 平面电磁波的传播规律.....7-5
  - 5.1 理想介质中的均匀平面波.....7-5
  - 5.2 电磁波的极化.....7-6
  - 5.3 有损耗介质和导电媒质.....7-6
  - 5.4 电磁波的反射与折射.....7-7
- 6 导行波的传输特性.....7-10
  - 6.1 柱形导波结构中的电磁场.....7-10
  - 6.2 导行波的相速和群速度.....7-10
  - 6.3 导行波的分类.....7-11
  - 6.4 导行波的波阻抗.....7-11

## 第 2 章 微波传输线

- 1 传输线理论.....7-13
  - 1.1 双线传输线传输特性.....7-13
  - 1.2 低损耗和无损耗线.....7-14
  - 1.3 无损耗传输线的工作状态.....7-14
  - 1.4 等效 TEM 波传输线.....7-14
- 2 带状线和微带线.....7-16
  - 2.1 带状线.....7-16
  - 2.2 微带线.....7-17
- 3 耦合带状线和耦合微带线.....7-19
  - 3.1 偶模和奇模激励.....7-19
  - 3.2 耦合带状线.....7-19
  - 3.3 耦合微带线.....7-20
- 4 同轴线.....7-21
- 5 矩形波导.....7-23
- 6 圆波导.....7-26
- 7 其他形式微波传输线.....7-27
  - 7.1 槽线和共面线.....7-27
  - 7.2 表面波传输线.....7-28

## 第 3 章 微波集成电路

- 1 微波网络表示法.....7-29
  - 1.1 散射参量.....7-29
  - 1.2 归一化阻抗矩阵与导纳矩阵.....7-30
  - 1.3 转移矩阵与传输矩阵.....7-30
  - 1.4 散射矩阵与其他电路矩阵的关系.....7-30
- 2 微带的不连续性.....7-31
- 3 集总、半集总元件和耦合微带线节.....7-33
  - 3.1 集总元件.....7-33
  - 3.2 半集总元件.....7-34
  - 3.3 耦合微带线节.....7-34
- 4 微带滤波器.....7-35
- 5 微带阻抗变换器.....7-38
- 6 微带线定向耦合器和环形电桥.....7-39
  - 6.1 定向耦合器.....7-39
  - 6.2 微带线环形电桥.....7-40
- 7 微带线功率分配器.....7-41
- 8 微波集成变频器.....7-42
  - 8.1 非线性电阻微波混频器.....7-42
  - 8.2 参量上变频器.....7-45
- 9 微波集成二极管倍频器.....7-45
- 10 微波集成晶体管放大器.....7-47
  - 10.1 小信号微波晶体管放大器.....7-48
  - 10.2 微波晶体管功率放大器.....7-48
- 11 微波集成半导体二极管振荡器.....7-51
  - 11.1 集成雪崩二极管振荡器.....7-51
  - 11.2 集成转移电子振荡器.....7-52
  - 11.3 电调谐.....7-52
- 12 微波集成 PIN 管控制电路.....7-53
  - 12.1 PIN 管开关电路.....7-53
  - 12.2 PIN 管电调衰减器.....7-54

## 第 4 章 同轴-波导电路

- 1 波导元件.....7-56
  - 1.1 矩形波导中的电抗元件.....7-56

1.2 连接元件 .....	7-57	2.2 天线阵 .....	7-83
1.3 终接元件 .....	7-57	3 面式天线 .....	7-86
1.4 波导分支接头与桥路 .....	7-58	3.1 惠更斯 (Huygens) 原理引用 .....	7-86
2 谐振腔 .....	7-59	3.2 平面口面的辐射 .....	7-86
3 衰减器与移相器 .....	7-61	<b>第7章 长波和中短波天线</b>	
4 阻抗调配器和阻抗变换器 .....	7-62	1 超长波与长波天线 .....	7-88
5 滤波器和定向耦合器 .....	7-63	2 中波天线 .....	7-90
6 微波铁氧体隔离器和环形器 .....	7-64	3 短波天线 .....	7-92
7 同轴-波导型微波固体电路		3.1 简单的短波天线 .....	7-93
示例 .....	7-65	3.2 同相水平天线 .....	7-96
<b>第5章 微波测量</b>		3.3 菱形天线 .....	7-96
1 测量线法测量驻波比和网络		<b>第8章 超短波天线</b>	
参数 .....	7-67	1 折合振子天线 .....	7-100
1.1 测量线法测量驻波比 .....	7-67	2 八木天线 .....	7-101
1.2 测量线法测量输入阻抗 .....	7-68	3 蝙蝠翼天线 .....	7-102
2 反射计法测量反射系数 .....	7-70	4 螺旋天线 .....	7-103
3 扫频测量系统和网络参数自		5 对数周期天线 .....	7-104
动测量装置 .....	7-70	6 背射天线 .....	7-105
3.1 扫频法测量反射系数 $ \Gamma $ .....	7-70	7 室内电视接收天线 .....	7-106
3.2 微波网络分析仪 .....	7-71	8 VHF~UHF 共用室外电视	
4 六端口测量技术 .....	7-71	接收天线 .....	7-108
5 微波网络参数的时域测量 .....	7-71	8.1 交叉馈电的 V-U 共用电视天线 .....	7-108
6 微波功率测量 .....	7-72	8.2 十二单元 V-U 共用电视天线 .....	7-108
7 微波频率、波长和 Q 值的测		<b>第9章 微波天线</b>	
量 .....	7-72	1 喇叭天线 .....	7-110
7.1 微波频率的测量 .....	7-72	2 抛物面天线 .....	7-111
7.2 微波波长的测量 .....	7-75	3 卡塞格伦 (Cassegrain) 天线 .....	7-114
7.3 谐振腔 Q 值的测量 .....	7-75	4 介质透镜天线 .....	7-114
8 衰减和相位移的测量 .....	7-75	5 泄漏波天线 .....	7-116
8.1 衰减的测量 .....	7-75	6 裂缝天线与微带天线 .....	7-117
8.2 相位移的测量 .....	7-75	6.1 裂缝天线 .....	7-117
<b>第6章 天线原理</b>		6.2 微带天线 .....	7-118
1 天线概述 .....	7-77	<b>第10章 地面波传播</b>	
1.1 天线功能 .....	7-77	1 地面波传播的特点 .....	7-122
1.2 天线的分类 .....	7-77	2 接收点场强 .....	7-122
1.3 天线的特性参数 .....	7-77	2.1 自由空间中接收点场强 .....	7-122
1.4 基本振子 .....	7-79	2.2 平面地面处接收点场强 .....	7-122
2 线式振子天线与天线阵 .....	7-81		
2.1 线式振子天线 .....	7-81		

- 2.3 大地的电参数.....7-123
- 2.4 考虑地球曲率半径时接收点场强.....7-123
- 2.5 通信段内大地电参数突变时接收点场强.....7-124

### 第11章 空间波传播

- 1 空间波传播的特点.....7-126
- 2 接收点处的场强.....7-126
  - 2.1 理想情况下接收点场强.....7-126
  - 2.2 考虑地球曲率后接收点场强.....7-126
  - 2.3 直视距离.....7-126
  - 2.4 天线的有效高度.....7-126
  - 2.5 球形地面对电波的扩散作用.....7-127
- 3 地质、地形对空间波传播的影响.....7-127
  - 3.1 地质情况对空间波的影响.....7-127
  - 3.2 粗糙不平地面对空间波的影响.....7-127
  - 3.3 传播余隙和  $F_1$ 、 $F_{1max}$  的作图求解法.....7-128
- 4 低空大气层对空间波的影响.....7-129
- 5 等效地球半径和等效地球

- 半径因子.....7-131
- 6 等效直视距离和等效天线高度.....7-132
- 7 发射角和到达角.....7-132
- 8 地球凸起和传播余隙.....7-133
  - 8.1 地球的凸起高度.....7-133
  - 8.2 传播余隙.....7-133
  - 8.3 反射点位置的计算.....7-134

### 第12章 天波传播

- 1 天波传播的特点.....7-135
- 2 电离层的形成、结构和变化规律.....7-135
- 3 天波在电离层中的传播路径.....7-136
- 4 临界频率、最高可用频率和最佳工作频率.....7-136
- 5 虚高、跃距和仰角.....7-137
- 6 天波的传输损耗.....7-138
- 7 接收点处的接收功率和场强.....7-141
- 8 与天波传播有关的图和表.....7-142
- 参考文献.....7-144

电子技术的迅速发展,使电磁波的应用不仅渗透到国民经济的各个领域,也深入到人们的日常生活之中。电磁波的应用可以归纳为两大类:其一是信息类应用,就是把电磁波作为信息的载体,用来传送数据、图象、语音,以及探测或检测物体,诸如通信、雷达、遥感和非电参量的测量;其二是能量类应用,将电磁波作为特殊的能源,用以加热物质,杀虫灭菌,以及进行医学诊断与治疗等。

人类依靠空间传播不同频率的电磁波,用以传递信息。无线电通信开发较早,习惯上把相应的可以不靠导线传输,而频率又低于红外线的电磁波,称为无线电波。利用无线电波作为传递信息的手段,需要应用各种器件与电路组合成为系统,产生

电磁振荡和进行电信号的加工处理。此外,还需要以适当的装置——天线,将携带信息的电磁波发送出去,并以适当的方式传播到预定接收点。本篇概括介绍各种天线的特性和电磁波传播的有关问题,以便在应用电磁波的工程技术中,有利于方案的合理决策。

微波是频率非常高的电磁波,它具有一系列不同于普通无线电波的特点,使得其所用的传输线、元件、器件和测量装置都与普通无线电频段的情况不同。微波技术已经成为无线电技术的独立分支。本篇给出微波传输线和各种微波电路的特性,以期在涉及微波技术的实际问题中,对电路选择合理和应用恰当。

## 第1章 概 论

### 1 电磁波谱

电磁波是大自然的宝贵资源。自由空间电磁波的波长 $\lambda$  (m)与频率 $f$  (Hz)的关系是 $\lambda = c / f$ 。 $c$ 为光速, $c = 3 \times 10^8$  m/s。

1. 电磁波谱的划分 电磁波谱是按电磁波波长的长短的顺序排列。电磁波谱的划分见表7-1-1。由于频率的不同,各波段电磁波的性质也有差别,因而它们有各自的主要应用。

2. 无线电波的波段划分 无线电波频率范围

很广,为使用方便,通常把它分成若干波段。波长从1 mm到0.1 mm的亚毫米波是无线电波与红外线的过渡。无线电波的波段划分及其作为信息类应用的主要用途见表7-1-2<sup>[1]</sup>。

3. 微波波段的细分 微波具有如下特点:波长很短,具有似光特性;频率很高,在电路中的延时效应、集肤效应、辐射效应等一般都明显地表示出来;能穿透电离层。因此,在科学技术领域,微波波段又可细分为17个频段,见表7-1-3<sup>[2]</sup>,相应的符号已被微波领域的科技人员广泛使用,大量出现

表7-1-1 电磁波谱的划分

名 称	波长范围 ( $\mu$ m)	频率范围 (GHz)
无线电波	长于 1 mm	小于 300
红 外 线	1000~0.78	$300 \sim 3.84 \times 10^5$
可 见 光	0.78~0.39	$3.84 \times 10^5 \sim 7.7 \times 10^5$
紫 外 线	0.39~0.01	$7.7 \times 10^5 \sim 3 \times 10^7$
X 射 线	0.01~ $10^{-5}$	$3 \times 10^7 \sim 3 \times 10^{10}$
Y 射 线	$10^{-5} \sim 10^{-9}$	$3 \times 10^{10} \sim 3 \times 10^{14}$

表7-1-2 无线电波段划分

波段名称	频段名称	波长范围	频率范围	主要用途	
微 波	毫米波	极高频 (EHF)	10~1mm	30~300GHz	电视、雷达、导航、中继通信、卫星通信、气象及天文学应用
	厘米波	特高频 (SHF)	10~1cm	3~30GHz	
	分米波	超高频 (UHF)	10~1dm	0.3~3GHz	

(续)

波段名称	频段名称	波长范围	频率范围	主要用途
超短波	甚高频 (VHF)	10~1m	30~300MHz	无线电广播、电视、雷达、导航、通信
短波	高频 (HF)	100~10m	3~30MHz	无线电广播及通信
中波	中频 (MF)	1000~100m	0.3~3MHz	无线电广播、无线电导航、电报通信
长波	低频 (LF)	10~1km	30~300kHz	电报通信、无线电导航
超长波	甚低频 (VLF)	100~10km	3~30kHz	地面远距离电报通信、潜艇水下通信
极长波	极低频 (ELF)	10 <sup>5</sup> ~100km	3Hz~3kHz	潜艇水下通信
	超低频 (ULF)	>10 <sup>5</sup> km	<3Hz	

表7-1-3 微波波段的划分及其相应符号

符号	UHF	L	LS	S	C	XC	X	Ku	K
频率范围 (GHz)	0.3~1.12	1.12~1.7	1.7~2.6	2.6~3.95	3.95~5.85	5.85~8.2	8.2~12.4	12.4~18.0	18.0~26.5
符号	Ka	Q	U	M	E	F	G	R	
频率范围 (GHz)	28.5~40.0	33.0~50.0	40.0~60.0	50.0~75.0	60.0~90.0	90.0~140.0	140.0~220.0	220.0~325.0	

注：表中Q、U、M和E频段相互有所重叠。

在科技文献中。

## 2 天线发射原理

天线是把高频电信号转换为空间电磁波的装

置。天线发射无线电波，也称电磁辐射，其过程可以用图7-1-1予以说明。图7-1-1 a表示两根平行导线相当于一个电容器，当给导线施加高频电流时，在导线间会产生交变电场，并形成位移电流。由于电

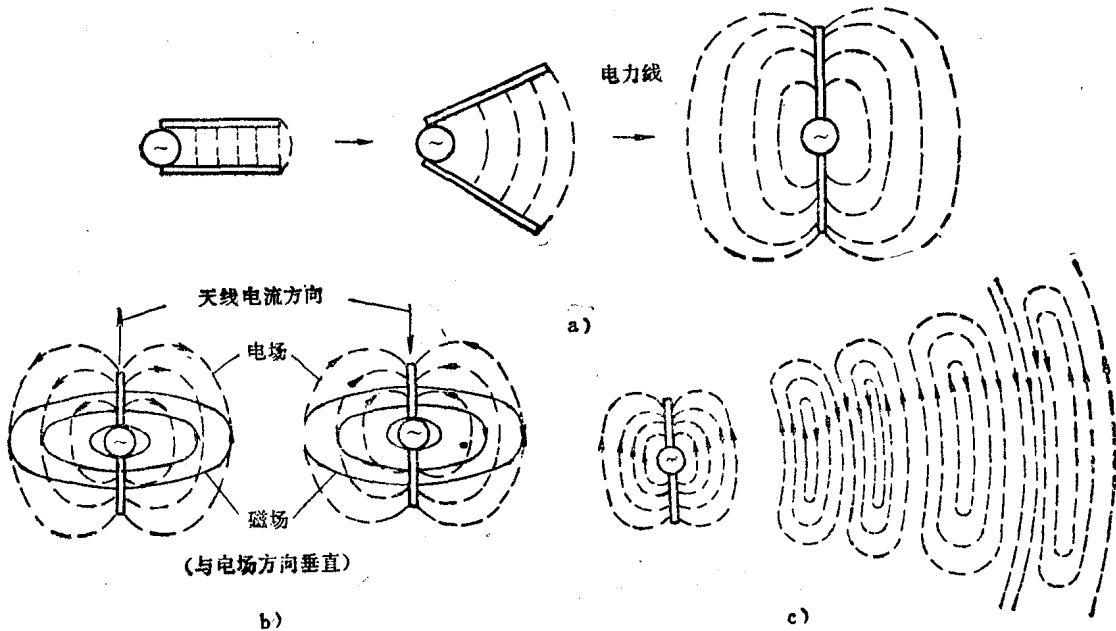


图7-1-1 无线电波发射过程示意图

a) 从电容器电路向天线电路的过渡 b) 天线周围空间产生的电场和磁场 c) 天线的发射情况

路呈闭合状态，电磁能量辐射不出去。但把两导线逐步展开，直至两导线在一直线位置，电力线也就逐步扩大到周围空间，从而演变为天线电路。根据麦克斯韦 (Maxwell) 的电磁场理论，变化的电场会产生变化的磁场，而变化的磁场也会产生变化的电场，于是形成图7·1-1 b 所示的电磁场分布。由于高频电流变化极快，在外层的电力线和磁力线刚刚建立起来，还来不及随着电流的终止而消失的时候，相反方向的电流又产生新的电力线和磁力

线，把前面的电力线和磁力线推向远方。周而复始，便形成电磁波辐射，如图7·1-1 c 所示。该图中只画出了电力线，随其变化的磁力线的形状是以天线为圆心、与天线相垂直、方向和密度随之变化的无数同心圆。

### 3 无线电波传播方式

无线电波 (简称电波) 的传播方式按传播的途径大致可分为图7·1-2所示的几种，不同传播方式

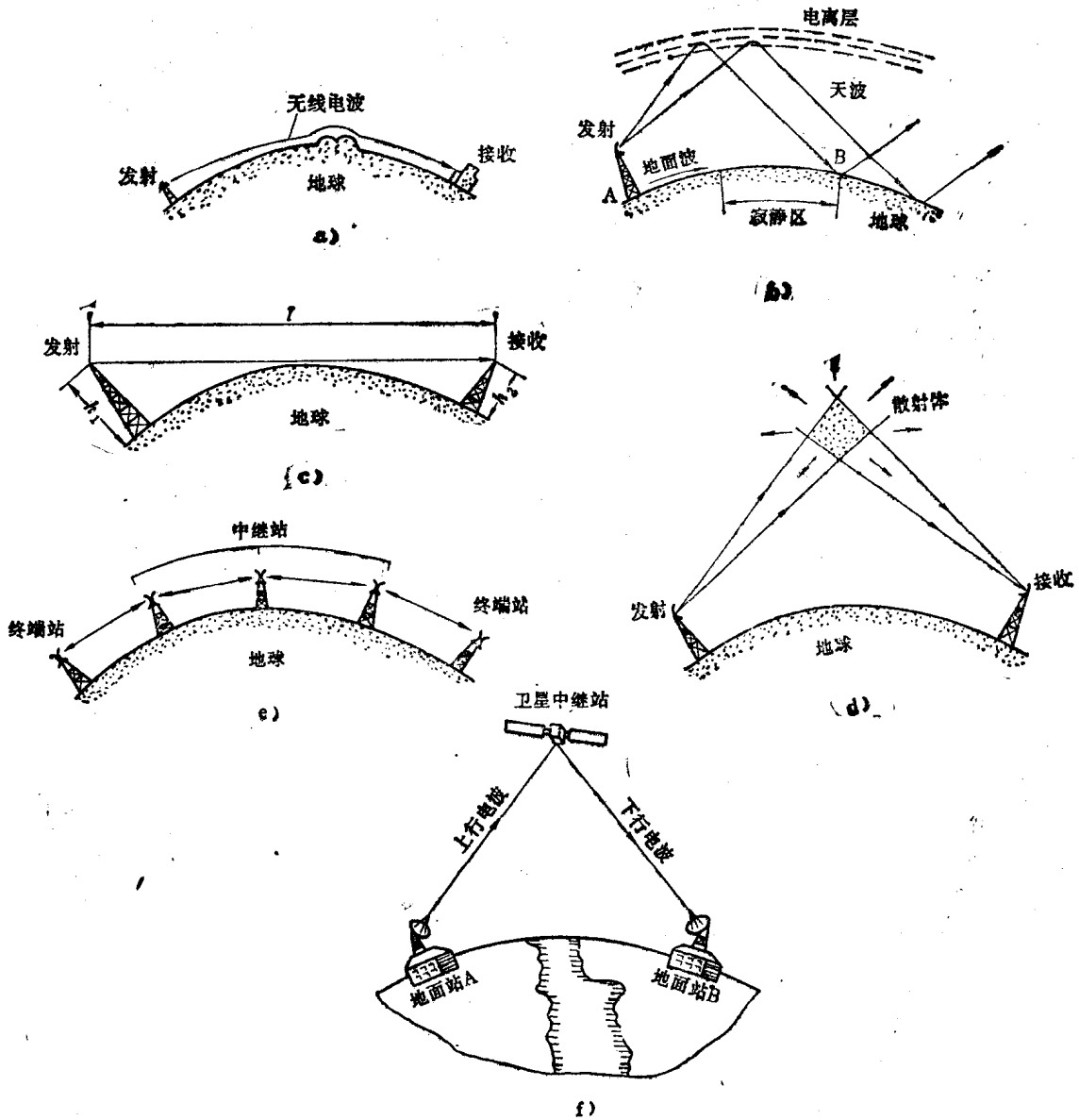


图7·1-2 无线电波的传播方式

- a) 地面波传播
- b) 天波传播
- c) 视距直线传播
- d) 散射传播
- e) 微波接力传播
- f) 卫星中继传播

适用于不同的波段。

(1) 地面波传播 电波沿地球的表面传播, 主要适用于长波和中波, 因为频率高时地面波传播的衰减很大。

(2) 天波传播 电波向天空辐射, 由电离层反射到达接收点。这是短波波段的主要传播方式, 因为电离层对短波的能量吸收较少, 大部分可以反射到地面。电离层对频率较低的电波却有很强烈的吸收。

(3) 视距直线传播 在超短波和微波波段, 电波能穿透电离层, 因而不能靠电离层反射来传播。视距直线传播是电波由发射天线辐射后经空间直线传播到接收点, 同时也存在着地面反射的波。由于地球是个椭圆球体, 传播距离限于视距范围之内。

(4) 散射传播 电波向天空发射后, 由大气对流层或电离层的不均匀体(大气成分和密度不均匀, 导致空间各点大气的折射率和介电常数不一致) 散射至接收点。超短波和微波利用散射传播,

可使传播距离比视距远得多。

(5) 微波接力传播 在发射端和接收端间建造一定数目的微波中继站, 实现微波的远距离通信。

(6) 卫星中继传播 利用微波能够穿透电离层的特性, 把微波信号发送到装有无线电接收和发送设备的地球同步卫星, 并由它转发给远离发送端的接收点。

#### 4 时变电磁场的基本关系

电磁辐射和电波传播是宏观电磁现象, 高频电信号在无线电设备中的传输过程也是宏观电磁现象。分析宏观电磁现象的基础是时变电磁场的基本关系。

1. 麦克斯韦方程组 麦克斯韦方程组阐明了电场与磁场的基本关系, 全面反映了宏观电磁现象的普遍规律(参见第2篇第1章)。场方程列于表7·1-4。表7·1-4中 $\nabla$ 是nabla算符(也称矢量微分算符), 它在直角坐标系和圆柱坐标系的表达式见表7·1-5<sup>[2]</sup>。

表7·1-4 麦克斯韦(Maxwell)方程

名 称	积 分 形 式	微 分 形 式
法拉第(Faraday)电磁感应定律	$\oint_l E dl = - \int_A \frac{\partial B}{\partial t} dA$	$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t}$
安培(Ampere)全电流定律	$\oint_l H dl = \int_A \left( J_c + \frac{\partial D}{\partial t} \right) dA$	$\nabla \times H = J_c + \frac{\partial D}{\partial t}$
高斯(Gauss)定律	$\oint_A D dA = \int_V \rho dV$	$\nabla \cdot D = \rho$
磁通连续性原理	$\oint_A B dA = 0$	$\nabla \cdot B = 0$

注:  $E$ 为电场强度(V/m);  $D$ 为电位移或称电通密度(C/m<sup>2</sup>);  $H$ 为磁场强度(A/m);  $B$ 为磁感应强度(T);  $J_c$ 为传导电流面密度(A/m<sup>2</sup>);  $\rho$ 为自由电荷体密度(C/m<sup>3</sup>)。

表7·1-5 微分算子

微分算子	直 角 坐 标	圆 柱 坐 标
矢量算符 (矢量微分算子)	$\nabla = \alpha_x \frac{\partial}{\partial x} + \alpha_y \frac{\partial}{\partial y} + \alpha_z \frac{\partial}{\partial z}$	$\nabla = \alpha_r \frac{\partial}{\partial r} + \alpha_\varphi \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} + \alpha_z \frac{\partial}{\partial z}$
一个标量的梯度 (gradient)	$\nabla \psi = \alpha_x \frac{\partial \psi}{\partial x} + \alpha_y \frac{\partial \psi}{\partial y} + \alpha_z \frac{\partial \psi}{\partial z}$	$\nabla \psi = \alpha_r \frac{\partial \psi}{\partial r} + \alpha_\varphi \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \varphi} + \alpha_z \frac{\partial \psi}{\partial z}$
一个矢量的散度 (divergence)	$\nabla \cdot A = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z}$	$\nabla \cdot A = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r A_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial A_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial A_z}{\partial z}$
一个矢量的旋度 (curl)	$\nabla \times A = \alpha_x \left( \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) + \alpha_y \left( \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \alpha_z \left( \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right)$	$\nabla \times A = \alpha_r \left( \frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial A_\varphi}{\partial z} \right) + \alpha_\varphi \left( \frac{\partial A_r}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial r} \right) + \alpha_z \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial (r A_\varphi)}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial A_r}{\partial \varphi} \right]$

2. 介质特性关系式 在均匀、线性、各向同性介质中, 反映介质特性的三个关系式是:

$$D = \epsilon E$$

$$B = \mu H$$

$$J_c = \sigma E$$

式中  $\epsilon$  为电容率 (介电常数) (F/m);  $\mu$  为磁导率 (H/m);  $\sigma$  为电导率 (S/m)。

真空或空气中的电容率和磁导率分别为  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$ ;  $\mu_0 = 1.2566 \times 10^{-6} \text{H/m}$ 。对于均匀、线性、各向同性媒质, 可分别按下式定义相对介电常数  $\epsilon_r$  和相对磁导率  $\mu_r$ :  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ ;  $\mu = \mu_r \mu_0$ 。 $\epsilon_r$  和  $\mu_r$  都是相对于真空而言的相对值, 是无量纲的纯数。非磁性媒质  $\mu_r \approx 1$ ,  $\epsilon_r$  则随具体媒质而异。

3. 电磁场的边界条件 求解电磁场的问题必须满足一定的边值关系, 即边界条件。两种介质和介质与理想导体 ( $\sigma = \infty$ ) 分界面上的边界条件分别示于图7-1-3和图7-1-4。相应的表达式列于表7-1-6。

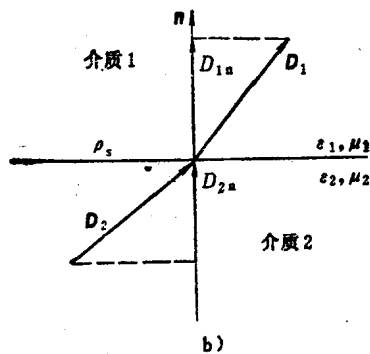
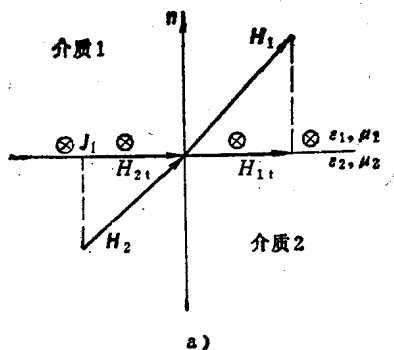


图7-1-3 两种介质分界面上的边界条件  
a)  $H_t$  的边界条件 b)  $D_n$  的边界条件

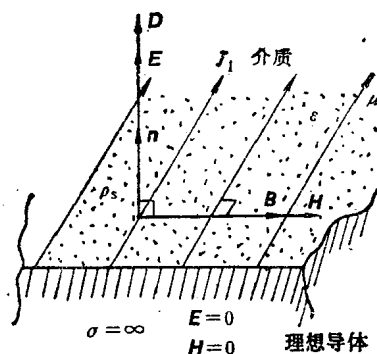


图7-1-4 介质与理想导体分界面上的边界条件

表7-1-6 电磁场的边界条件

情况	两种介质分界面上	介质与理想导体分界面上
表达式	$E_{1t} = E_{2t}$ $D_{1n} - D_{2n} = \rho_A$ $H_{1t} - H_{2t} = J_1$ $B_{1n} = B_{2n}$	$E_{1t} = 0$ $D_{1n} = \rho_A$ $H_{1t} = J_1$ $B_{1n} = 0$

注:  $\rho_A$  ( $\text{C/m}^2$ ) 为分界面上自由电荷的面密度。  $J_1$  ( $\text{A/m}$ ) 为分界面上电流的线密度, 方向与磁场强度垂直。下标 t 和 n 分别表示法线和切线方向分量

## 5 平面电磁波的传播规律

所谓电磁波是指传播着的时变电磁场。最简单而又最基本的电磁波为谐变均匀平面波——其波阵面 (相位相等的面) 为平面, 且波阵面内各点场强均相等, 随时间作正弦变化。图7-1-5是某一确定时刻谐变均匀平面波示意图。

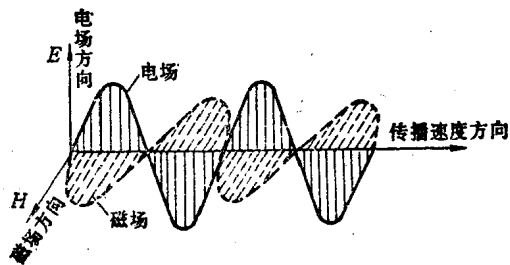


图7-1-5 谐变均匀平面波示意图

### 5.1 理想介质中的均匀平面波

1. 电磁场波动方程 在理想介质 ( $\sigma = 0, \epsilon$  和  $\mu$  均为实数) 的无源区域 ( $\rho = 0, J = 0$ ), 电



场和磁场满足矢量波动方程:

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 \mathbf{E} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} &= 0 \\ \nabla^2 \mathbf{H} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7.1-1)$$

式中  $\nabla^2$  为拉普拉斯算子 (Laplacian), 在直角坐标系中  $\nabla^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2$ ;  $t$  为时间变量。

2. TEM 波 若取直角坐标系, 并设定电磁波的传播方向 (称为纵向) 为  $z$  方向, 根据麦克斯韦方程可确定在无限大 (即是无界) 理想介质中的均匀平面波没有电磁场纵向分量, 只有横向 (与传播方向垂直) 分量。这种电磁波称为横电磁波, 或简称 TEM 波 (transverse electromagnetic waves)。

3. 亥姆霍兹方程 对于均匀平面波, 设电场和磁场分别取向为  $x$  和  $y$  方向, 则  $E_x$  和  $H_y$  满足复数形式的波动方程——亥姆霍兹 (Helmholtz) 方程:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} + k^2 E_x &= 0 \\ \frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2} + k^2 H_y &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7.1-2)$$

式中  $k = \omega \sqrt{\varepsilon \mu}$ ,  $\omega$  为角频率 (rad/s)。

4. 传播常数和相位常数 令  $\gamma = j\omega \sqrt{\varepsilon \mu} = j\beta$ , 则式 (7.1-2) 成为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} &= \gamma^2 E_x \\ \frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2} &= \gamma^2 H_y \end{aligned} \right\} \quad (7.1-3)$$

如果只考虑沿  $z$  方向行进的波, 方程 (7.1-3) 的解的复数形式为

$$\left. \begin{aligned} E_x &= E_{x0} e^{\gamma z} = E_{x0} e^{-j\beta z} \\ H_y &= H_{y0} e^{\gamma z} = H_{y0} e^{-j\beta z} \end{aligned} \right\} \quad (7.1-4)$$

式中下标  $x_0$  和  $y_0$  表示坐标原点处的场分量。 $\gamma$  称为传播常数;  $\beta$  (rad/m) 表示电磁波沿  $z$  方向传播时每单位距离落后的相位, 称为相位常数。

5. 相速度 设  $E_{x0}$  和  $H_{y0}$  的初相位为 0, 其振幅分别为  $E_{xm}$  和  $H_{ym}$ , 则式 (7.1-4) 的瞬时形式为

$$\begin{aligned} E_x(z, t) &= E_{xm} \cos(\omega t - \beta z) \\ H_y(z, t) &= H_{ym} \cos(\omega t - \beta z) \end{aligned}$$

等相位面移动的速度称为相速度  $v_p$  (m/s):

$$v_p = \omega / \beta = 1 / \sqrt{\varepsilon \mu}$$

在传播方向上相位相差为  $2\pi$  的两点间的距离即为波长  $\lambda$ , 因而  $\beta = 2\pi / \lambda$ 。

#### 6. 相速度与波长及频率的关系

$$v_p = \lambda f = \lambda_0 f / \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}$$

式中  $\lambda_0$  为电磁波在自由空间的波长。

7. 波阻抗 电磁波的电场横向分量与磁场横向分量之比称为波阻抗。均匀平面波的波阻抗为

$$\eta_{\text{TEM}} = E_x / H_y = \omega \mu / \beta = \sqrt{\mu / \varepsilon} \quad (\Omega)$$

在空气介质中

$$\eta_0 = \sqrt{\mu_0 / \varepsilon_0} = 120\pi \approx 377 \Omega$$

#### 5.2 电磁波的极化

电磁波的极化是指  $\mathbf{E}$  在空间的取向。沿  $z$  方向传播的平面波, 一般情况下,  $E_x$  和  $E_y$  都可能存在, 且其振幅和相位不一定相同。设

$$E_x = E_{xm} \cos(\omega t - \beta z + \varphi_x)$$

$$E_y = E_{ym} \cos(\omega t - \beta z + \varphi_y)$$

$$\varphi_x - \varphi_y = \psi \quad (\psi \text{ 表示初相位})$$

根据  $E_x$  和  $E_y$  的振幅及相位关系, 电磁波的极化可分为三种情况, 归纳于表 7.1-7。

#### 5.3 有损耗介质和导电媒质

1. 有损耗介质 电介质 (电导率  $\sigma = 0$ ) 在潜变电磁场频率不很高时, 其损耗一般可忽略。但在很高频率下, 损耗显著起来, 其原因在介质中存在着阻尼力, 介质极化跟不上外加高频电场的变化。有损耗电介质的介电常数是一个复数, 且与频率有关:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega) = \varepsilon'(1 - j \tan \delta)$$

$\varepsilon'(\omega)$  表示介质原来的介电常数,  $\varepsilon''(\omega)$  反映介质损耗的介电常数。 $\delta$  称为电损耗角,  $\tan \delta$  是表示介质损耗大小的一个参量。

同理, 磁介质的磁导率在高频下也是复数:

$$\mu(\omega) = \mu'(\omega) - j\mu''(\omega) = \mu'(1 - j \tan \delta_m)$$

$\delta_m$  称为磁损耗角,  $\tan \delta_m$  表示磁介质损耗的程度。

一般有损耗介质可不考虑其磁损耗。

一些常用高频电介质的电特性见表 7.1-8<sup>[3]</sup>。

2. 导电媒质 电导率  $\sigma \neq 0$  的媒质称为导电媒质。电磁波在这种媒质中传播会产生传导电流, 故有

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H} &= \sigma \mathbf{E} + j\omega \varepsilon \mathbf{E} = j\omega \varepsilon \left( 1 - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \right) \mathbf{E} \\ &= j\omega \tilde{\varepsilon} \mathbf{E} \end{aligned}$$

$$\tilde{\varepsilon} = \varepsilon \left( 1 - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \right) = \varepsilon (1 - j \tan \delta_c)$$