

电 信 工 程 设 计 手 册

**天 线 和 馈 电 线**

邮电部北京设计院 编  
陈国玟 高福群 薛发 执笔  
李昌猷 总审

人 民 邮 电 出 版 社

# 目 录

第一章 天线基本原理及电参数	1
1.1 概述	1
1.2 电磁理论基础	2
1.2.1 麦克斯韦方程	2
1.2.2 边界条件、里昂托维奇边界条件	3
1.2.3 乌莫夫—坡印亭定理	4
1.2.4 麦克斯韦方程的解	5
1.3 基本振子的辐射	7
1.3.1 电基本振子的辐射	7
1.3.2 磁基本振子的辐射	8
1.4 自由空间中单导线的辐射	9
1.4.1 单导线上的电流分布	9
1.4.2 单导线的辐射场	9
1.4.3 单导线的辐射电阻	12
1.5 自由空间中对称振子的辐射	13
1.5.1 对称振子上的电流分布	13
1.5.2 对称振子的辐射场	14
1.5.3 对称振子的辐射阻抗	14
1.6 天线阵的方向性	16
1.6.1 二元天线阵	16
1.6.2 $n$ 元等幅等间距直线阵	18
1.6.3 方向图乘积定理的推广	23
1.6.4 连续源直线阵	24
1.6.5 产生最佳方向图的直线阵的电流分布	25
1.7 面天线的辐射	26
1.7.1 同相激励矩形平面的辐射特性	26
1.7.2 激励振幅沿 $x$ 轴按 $E = E_0 \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right)$ 的规律变化时, 同相激励矩形平面的辐射特性	27
1.7.3 同相均匀激励的圆形平面的辐射特性	28
1.7.4 非均匀激励的圆形平面的辐射特性	28
1.7.5 相位畸变对辐射面参数的影响	29
1.8 地面对天线电性能的影响	29
1.8.1 天线与镜像电流的关系	29
1.8.2 地面对天线辐射图的影响	30
1.9 感应电动势法	32

1.9.1	二平行等长振子的互阻抗	32
1.9.2	二平行半波对称振子的互阻抗	33
1.9.3	二齐平( $H_1=0$ )平行等长对称振子的互阻抗	33
1.9.4	两并线( $d=0$ )半波对称振子的互阻抗	34
1.9.5	二耦合振子的辐射阻抗和电流的计算	34
1.9.6	地面对于振子辐射阻抗的影响	35
1.10	互易原理 用互易原理分析接收天线	36
1.10.1	线性无源四端网络中的互易原理	36
1.10.2	用互易原理分析接收天线	37
1.11	天线的电参数	38
1.11.1	辐射方向图	38
1.11.2	方向系数、增益系数和效率	38
1.11.3	有效高度、有效面积和口径效率	41
1.11.4	极化、极化损失、极化去耦和轴比	42
1.11.5	辐射阻抗和输入阻抗	45
1.11.6	驻波比和行波系数	46
1.11.7	工作频带宽度	46
1.11.8	$G/T$ 值	46
	参考文献	46
	附录	47
<b>第二章</b>	<b>线形天线</b>	<b>75</b>
2.1	概述	75
2.2	长波及中波天线	75
2.2.1	长波及中波天线的基本型式	75
2.2.2	垂直天线的垂直面方向图和辐射场强	77
2.2.3	辐射电阻和输入阻抗	78
2.2.4	天线电容、特性阻抗、电抗和等效高度的计算	81
2.2.5	天线的损耗和辐射效率	85
2.2.6	长、中波天线的匹配	89
2.2.7	伞形折合馈地式中波天线	93
2.2.8	中波T型天线结构图	97
2.3	近距离短波通信天线	98
2.3.1	水平对称振子	98
2.3.2	水平对称振子的设计	109
2.3.3	垂直对称振子	118
2.3.4	几种常用的筒式天线	120
2.4	同相水平天线	129
2.4.1	窄带同相水平天线电参数的计算	130
2.4.2	窄带同相水平天线的设计	135
2.4.3	宽波段同相水平天线电参数的计算	136

2.4.4	宽波段同相水平天线的设计	148
2.4.5	平面形振子宽波段同相水平天线	157
2.5	菱形天线	162
2.5.1	菱形天线电参数的计算	162
2.5.2	菱形天线的设计	185
2.5.3	重菱形天线和交错叠菱形天线阵	196
2.5.4	双偏菱形天线	213
2.6	鱼骨形天线	215
2.6.1	沿集合线上的传播相速对天线电参数的影响	215
2.6.2	电阻耦合鱼骨形天线电参数的计算	217
2.6.3	电阻耦合鱼骨形天线的设计	225
2.7	对数周期天线	230
2.7.1	LPD 天线的结构参数	230
2.7.2	LPD 天线的方向图函数	231
2.7.3	LPD 天线的设计	239
2.7.4	轻便型对数周期偶极子天线	253
2.7.5	固定电台用对数周期偶极子天线的设计图	261
2.7.6	其它型式的对数周期天线	265
2.8	单导线行波天线和V形天线	271
2.8.1	单导线行波天线	271
2.8.2	V形天线	277
2.9	假天线和发射菱形天线的衰减线设计	280
2.9.1	设计指标要求	280
2.9.2	输入端最大工作电流 $I_a$ 的计算	280
2.9.3	导线安全工作电流 $I_s$ 的计算	281
2.9.4	导线最高工作温度	282
2.9.5	导线线径的选择	283
2.9.6	衰减常数 $\beta$ 的计算	283
2.9.7	假天线和衰减线的最小长度	284
2.10	有源环形天线	285
2.10.1	有源环单元	285
2.10.2	有源环直线阵	286
2.10.3	有源环形天线的应用	293
2.11	引向天线	295
2.11.1	引向天线的方向图和增益	295
2.11.2	引向天线的设计	297
2.12	移动通信用天线	304
2.12.1	常用的基地局天线	304
2.12.2	移动站天线	314
2.13	线形天线电参数的测量	315

2.13.1	天馈线系统参数的测量	315
2.13.2	天线的水平面方向图和前后比的测量	319
2.13.3	天线的垂直面方向图的测量	320
2.13.4	天线增益系数的测量	320
2.13.5	测量天线参数用的仪器	321
2.14	短波无线电通信电台天线单项工程设计	323
2.14.1	设计依据和设计任务	323
2.14.2	天线场地要求	323
2.14.3	天线选型	328
2.14.4	天线场地布置	336
2.14.5	天线的结构设计	339
	参考文献	351
附录 I	世界各大城市经纬度表(附北京、上海、乌鲁木齐为中心的方位角及大圆距离数据)	352
附录 II	国内主要城市经纬度表(附北京、上海为中心的方位角及大圆距离数据)	356
<b>第三章</b>	<b>面形天线</b>	<b>360</b>
3.1	面形天线的一般要求	360
3.1.1	微波接力通信用的天线的特性	360
3.1.2	卫星通信地球站用的天线的特性	363
3.1.3	国际通信卫星组织对标准地球站天线系统的要求	365
3.1.4	国际海事卫星(INMARSAT)对标准船舶地球站的要求	368
3.2	喇叭天线和反射镜天线的高效率馈源	368
3.2.1	喇叭天线	368
3.2.2	反射镜天线的高效率馈源	374
3.3	抛物面天线	394
3.3.1	旋转抛物面的主要几何特性	394
3.3.2	旋转抛物面表面上的电流	395
3.3.3	旋转抛物面天线的方向性	397
3.3.4	旋转抛物面天线的增益	398
3.3.5	旋转抛物面天线的设计	400
3.3.6	喇叭—抛物面天线	402
3.4	双反射面天线	407
3.4.1	双反射面天线的增益系数	407
3.4.2	天线的噪声温度	408
3.4.3	卡塞格伦天线几何参数的选择	409
3.4.4	接收系统等效噪声温度 $T_x$ 和 $G/T$ 值	414
3.4.5	改进型双反射面天线	414
3.5	抛物面天线和双反射面天线的应用	433
3.5.1	微波抛物面天线型谱系列	433
3.5.2	微波抛物面天线方向图	436

3.5.3	国产微波接力通信系统用的天线	445
3.5.4	国内地球站用的卡塞格伦天线	449
3.6	潜望镜天线系统	458
3.6.1	潜望镜天线系统的增益	458
3.6.2	潜望镜天线系统的方向性	462
3.6.3	潜望镜天线系统的应用	462
3.7	无源中继器和环形引向器	462
3.7.1	无源中继器	462
3.7.2	环形引向器	469
3.8	螺旋天线	473
3.8.1	轴向辐射型螺旋天线的方向图	474
3.8.2	轴向辐射型螺旋天线的增益和输入阻抗	475
3.8.3	轴向辐射型螺旋天线几何参数的选择	475
3.8.4	螺旋天线的相位中心	477
3.9	背射天线	477
3.9.1	背射天线的设计	478
3.9.2	几种长背射天线的结构尺寸及其电特性	481
3.9.3	短背射天线	483
3.10	国际通信卫星 (IS) 天线	485
3.10.1	一般特性要求	485
3.10.2	IS-1~V 卫星天线特性表	486
3.11	微波天线参数测量	488
3.11.1	天线增益和方向图的测量	488
3.11.2	天馈线驻波比测量	490
3.11.3	极化去耦测量	491
3.12	地球站天线的测量	492
3.12.1	天线接收增益 $G_R$ 的测量	492
3.12.2	$G/T$ 值的测量	493
3.12.3	天线接收方向图的测量	496
3.12.4	天线发射增益 $G_T$ 的测量	496
3.12.5	天线发射方向图的测量	497
	参考文献	497
<b>第四章</b>	<b>架空明线馈电线路</b>	<b>498</b>
4.1	馈电线路的基本特性公式	498
4.1.1	一次参数 $R$ 、 $L$ 、 $C$ 、 $G$ 的计算	498
4.1.2	由一次参数计算二次参数 $\beta$ 、 $\alpha$ 、 $W$	500
4.1.3	从二次参数计算一次参数	500
4.1.4	理想馈电线上电压电流的公式	500
4.1.5	馈电线基本公式一览表	501
4.2	输入阻抗及特性阻抗	502

4.3	反射系数、行波系数、驻波比及反射损耗	502
4.4	衰减、效率	508
4.5	最大电压、电位、电流、电场强度	512
4.6	最大传输功率	513
4.7	不平衡系数及波斜角	513
4.8	利用已知馈电线的参数计算天线的输入阻抗	513
4.9	馈电线的天线效应	514
4.10	常用馈电线的特性	514
4.10.1	最大允许功率	514
4.10.2	衰减	515
4.10.3	特性阻抗	517
4.11	常用短波发信馈电线的结构及工艺要求	519
4.11.1	工艺要求	519
4.11.2	垂度	521
4.11.3	结构尺寸	521
4.11.4	起始、终端及配线区	524
4.12	常用短波收信馈电线的结构及工艺要求	526
4.12.1	工艺要求	526
4.12.2	结构尺寸	520
4.12.3	起始及终端	529
4.13	常用中波馈电线的结构及工艺要求	533
4.13.1	工艺要求	533
4.13.2	结构尺寸	534
4.14	阻抗匹配线段的计算	537
4.14.1	指数馈线变阻线的计算	537
4.14.2	多节阶梯变阻线的计算	538
4.14.3	插入线匹配法	544
4.14.4	短截线匹配法	550
4.15	几种常用的变阻线	554
4.15.1	指数馈线变阻线	554
4.15.2	多节阶梯馈线变阻线	557
4.16	阻抗圆图及使用举例	560
4.17	馈电线的多工制使用	562
4.17.1	电路图	562
4.17.2	多工制滤波器的计算	562
4.18	馈电线的测试及施工要求	566
4.18.1	馈电线的技术要求	566
4.18.2	馈电线的测试	566
4.18.3	馈电线的施工要求	567
4.19	馈电线的常用材料及元器件	568

4.19.1	馈线杆	568
4.19.2	混凝土电杆配件及馈线构件图	569
4.19.3	绝缘子及零件图	570
<b>第五章</b>	<b>同轴线及波导</b>	<b>587</b>
5.1	微波传输线的一般概念	587
5.1.1	波型	589
5.1.2	临界波长、相速及群速	589
5.1.3	波的衰减	590
5.1.4	波导的选择及要求	591
5.1.5	电长度	591
5.1.6	波导中的波长 $\lambda_g$	592
5.1.7	相位特性	593
5.2	同轴线	593
5.2.1	同轴线在工作频率增高时的缺点	593
5.2.2	同轴线中的场及临界波长	593
5.2.3	同轴线的主要计算公式	594
5.2.4	同轴线的效率及最大传输功率	597
5.2.5	常用国产射频电缆型号及性能	597
5.2.6	常用国产射频电缆新旧型号对照	629
5.2.7	高频插头座	629
5.2.8	国外同轴电缆典型产品	639
5.3	矩形波导及波导元件型号命名方法	641
5.3.1	矩形波导中的场	641
5.3.2	矩形波导中的临界波长及波导尺寸的选取	642
5.3.3	矩形波导中的衰减系数	646
5.3.4	矩形波导中的功率通量	648
5.3.5	波导元件型号命名方法及常用国内外矩形波导规格	649
5.3.6	国产矩形与扁矩形波导法兰盘规格	658
5.4	圆形波导	662
5.4.1	圆形波导中的场	662
5.4.2	圆形波导中的临界波长	662
5.4.3	圆形波导中的衰减	665
5.4.4	圆形波导中的功率通量	667
5.4.5	矩形及圆形开口波导的应用	668
5.4.6	常用圆形波导的规格	668
5.5	椭圆软波导	669
5.5.1	椭圆软波导的优点	669
5.5.2	椭圆波导中的场和波型	669
5.5.3	椭圆波导中的临界波长和带宽	670
5.5.4	椭圆波导中的衰减	670



5.5.5	椭圆波导中的功率通量 .....	671
5.5.6	椭圆软波导在实际应用中的考虑 .....	671
5.5.7	三种波导的比较 .....	672
5.5.8	常用椭圆软波导的规格 .....	672
5.6	$\pi$ 形和H形波导 .....	673
5.7	茧形软波导 .....	676
5.8	开波导 .....	676
5.9	波导器件 .....	677
5.9.1	转接元件 .....	677
5.9.2	匹配元件 .....	678
5.9.3	极化旋转器 .....	683
5.9.4	极化分离器 .....	684
5.9.5	杂模滤波器 .....	684
5.9.6	椭圆度补偿器(极化补偿器) .....	686
5.9.7	密封节 .....	686
5.9.8	弯波导 .....	686
5.9.9	波导分支接头 .....	687
5.9.10	常用波导器件的尺寸 .....	688
5.10	常用微波馈线系统 .....	703
5.10.1	2 吉赫馈线系统 .....	703
5.10.2	4 吉赫馈线系统 .....	703
5.10.3	6 吉赫馈线系统 .....	705
5.10.4	8 吉赫馈线系统 .....	708
5.10.5	用于 4、6、7 吉赫的天馈线系统 .....	710
5.11	微波馈线的设计安装要点 .....	711
5.11.1	同轴电缆的安装 .....	711
5.11.2	波导器件的设计安装原则 .....	711
5.11.3	软波导的使用原则 .....	713
5.11.4	波导的加固原则及方法 .....	713
5.11.5	矩形密封节的安装原则 .....	714
5.11.6	$E_{01}$ 模滤波器的安装原则 .....	716
5.11.7	分路系统的安装要点 .....	716
5.11.8	分路系统在机架上的安装步骤 .....	717
5.11.9	极化分离器的安装要点 .....	717
5.12	微波馈线系统的测试 .....	719
5.12.1	整条馈线的极化去耦测试 .....	719
5.12.2	整条馈线的驻波比测试 .....	719
5.12.3	整条馈线的衰减测试 .....	721
5.12.4	整条馈线的密封程度测试 .....	722
	参考文献 .....	723

第六章 天线杆塔	724
6.1 概说	724
6.1.1 概述	724
6.1.2 设计天线杆塔的一般原则	726
6.2 设计天线杆塔的基础资料	727
6.2.1 自然条件资料	727
6.2.2 工艺设计应提供的资料	728
6.3 荷载	728
6.3.1 荷载分类	728
6.3.2 结构自重和设备重量	729
6.3.3 风荷载	730
6.3.4 裹冰荷载与积雪荷载	736
6.3.5 温度荷载	737
6.3.6 地震荷载	738
6.3.7 活荷载	739
6.3.8 天线网荷载	739
6.3.9 作用于抛物面天线上的风荷载	742
6.4 桅杆	744
6.4.1 桅杆的选型和选材	744
6.4.2 拉线布置	760
6.4.3 天线桅杆计算原理	760
6.4.4 拉线计算	762
6.4.5 杆身计算	764
6.4.6 杆身内力及杆件计算	771
6.4.7 用计算机进行桅杆受力分析简介	772
6.4.8 计算例题	780
6.4.9 桅杆的抗扭计算	792
6.4.10 桅杆整体稳定性计算	793
6.4.11 常用桅杆参考图	796
6.5 自立塔	803
6.5.1 自立塔的选型和材料	803
6.5.2 自立塔的计算方法	807
6.5.3 平面桁架法	807
6.5.4 分层空间桁架法	810
6.5.5 简化空间桁架法	812
6.5.6 K型斜杆塔在侧向力作用下的杆件内力	812
6.5.7 扭力作用下杆件内力	813
6.5.8 塔位移计算	814
6.5.9 横隔的设置和计算	816
6.5.10 结构尺寸和构件的统一问题	817

6.5.11 微波塔通用设计的选用	817
6.6 构件与连接计算	828
6.6.1 构件计算	828
6.6.2 构件连接计算	831
6.7 木杆塔	835
6.7.1 木杆塔的组成与构造	835
6.7.2 木杆的计算	844
6.7.3 木杆构件计算	846
6.8 钢筋混凝土及预应力钢筋混凝土杆塔	847
6.8.1 概说	847
6.8.2 钢筋混凝土构件计算及构造	849
6.9 基础与地锚	859
6.9.1 基础分类	859
6.9.2 基础构造要求	861
6.9.3 基础计算	863
6.9.4 地锚的种类与计算	866
参考文献	872

6.5.11 微波塔通用设计的选用	817
6.6 构件与连接计算	828
6.6.1 构件计算	828
6.6.2 构件连接计算	831
6.7 木杆塔	835
6.7.1 木杆塔的组成与构造	835
6.7.2 木杆的计算	844
6.7.3 木杆构件计算	846
6.8 钢筋混凝土及预应力钢筋混凝土杆塔	847
6.8.1 概说	847
6.8.2 钢筋混凝土构件计算及构造	849
6.9 基础与地锚	859
6.9.1 基础分类	859
6.9.2 基础构造要求	861
6.9.3 基础计算	863
6.9.4 地锚的种类与计算	866
参考文献	872

# 第一章 天线基本原理及电参数

## 1.1 概 述

天线是无线电通信电路的重要组成部分，它的作用是有效地发射或接收电磁波。在发射端，天线把高频电流形式的能量转变成同频率的无线电波能量发射出去；在接收端，则把接收下来的高频无线电波能量转变成同频率的电流能量传送给接收设备。由于天线的重要作用，所以它总是随着无线电通信的发展而发展，同时又直接影响和促进了无线电通信的发展。

在将近一个世纪前，德国赫芝作试验用的赫芝偶极子就是第一个天线。本世纪初，无线电通信还只局限于长、中波领域，当时所用的天线的基本型式是垂直极化的电小天线。到二十年代初期，开始出现接收用定向天线——波天线，到三十年代中期就比较普遍地采用定向发射天线于长、中波通信了。在这期间，定向天线对长、中波通信的进一步发展起了重要作用。

短波通信是在二十年代中期利用小功率发射机和简单天线发展起来的，当时正好是太阳活动性的高年。但是到了三十年代初，由于太阳活动性进入低年，用简单天线和小功率进行远距离通信遇到了极大困难。随着人们对电离层传播特性的了解和设计出高增益的定向天线后，又使短波通信发展起来。最初的短波定向天线是垂直极化的，后来发展用水平极化天线。在接收方面还采用了汇集接收天线和可以控制垂直面波瓣的天线系统。五十年代末提出的对数周期结构天线，使短波天线实现了真正的宽频带，也满足了其它通信领域对宽频带天线的要求。尔后出现有源天线使短波接收天线初步实现了小型化，这对于减小场地面积具有重要的意义。

微波接力通信和卫星通信的发展同样和天线的发展分不开。可以认为，如果没有设计出增益高达60分贝以上的面形天线，要想在卫星通信中补偿200分贝以上的传输损耗并建立大容量的稳定可靠通信将是极困难的。

六十年代以后发展起来的自适应天线阵，将使无线电通信质量发生很大的变化。但这种天线已是一种场路结合的技术。

天线理论的研究和发展是使天线取得进步的基础。载流天线结构的电磁辐射和电磁波的散射绕射问题是天线理论的主要问题，它们都是根据边界条件求解麦克斯韦方程或波动方程的问题。求解天线问题的方法大致可分为三类：(1) 严格解析法，(2) 近似解析法和(3) 数值法。

严格解析法的优点是可以获得精确的答案。但是，到目前为止，在天线领域内得到严格解的问题还不多。

近似解析法又可分为：(1) 微扰法，(2) 变分法，(3) 迭代法，(4) 高频技术如几何光学法，物理光学法、几何绕射法和物理绕射法等。这些方法的优点在于，它们能够解决许多用严格解析法不能解决的问题，而且能够较简单地获得适用的近似解答。

数值法包括纯数值解和矩量法。由于电子计算机的不断发展，使数值法得到广泛的应

用。

从六十年代发展起来的“几何绕射法”和“矩量法”可以认为是天线理论的突破，并将成为今后发展天线理论的一些主要方面。

鉴于天线在无线电通信系统中的重要作用，所以对天线的研究和设计工作一直十分重视。从工程设计观点考虑，还有经济原因，因为天线单项工程投资占到无线电通信工程总投资额的  $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{3}$ 。

在工程设计中，设计面形天线和线形天线的任务是不同的。面形天线的设计和制造由工厂完成，工程设计中只要根据电路要求选择合适产品，作出安装设计就可以了。线形天线的设计则是工程设计的任务。

各种天线的特性参数的计算和设计程序将在下面各章中叙述，供设计天线参考。

## 1.2 电磁理论基础

### 1.2.1 麦克斯韦方程

麦克斯韦方程是电磁场的理论基础，也是天线理论的基础。它表示电场和磁场之间以及它们和电荷、电流之间互相联系的普遍规律。麦氏方程有以下两种表述形式：

$$\left. \begin{array}{ll}
 \text{积分形式} & \text{微分形式} \\
 \text{I) } \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = i + \frac{\partial \Psi}{\partial t} & \text{I) } \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\
 \text{II) } \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial \phi}{\partial t} & \text{II) } \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\
 \text{III) } \oint_s \vec{D} \cdot d\vec{s} = q & \text{III) } \nabla \cdot \vec{D} = \rho \\
 \text{IV) } \oint_s \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 & \text{IV) } \nabla \cdot \vec{B} = 0
 \end{array} \right\} \quad (1-2-1)$$

在各向同性媒质中：

$$\left. \begin{array}{l}
 \vec{D} = \epsilon \vec{E} \\
 \vec{B} = \mu \vec{H} \\
 \vec{J} = \sigma \vec{E}
 \end{array} \right\} \quad (1-2-2)$$

从而(1-2-1)式变为：

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{I) } \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\
 \text{II) } \nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \\
 \text{III) } \nabla \cdot \vec{E} = \rho / \epsilon \\
 \text{IV) } \nabla \cdot \vec{H} = 0
 \end{array} \right\} \quad (1-2-3)$$

对于随时间作正弦变化的电磁场则为：

$$\left. \begin{aligned} \text{I)} \quad \nabla \times \vec{H} &= +\vec{J} \omega \varepsilon \vec{K} \\ \text{II)} \quad \nabla \times \vec{E} &= -j \omega \mu \vec{H} \\ \text{III)} \quad \nabla \cdot \vec{E} &= \rho / \varepsilon \\ \text{IV)} \quad \nabla \cdot \vec{H} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-2-1)$$

在以上各式中:

$\vec{E}$  为电场强度矢量, 单位是伏/米;

$\vec{H}$  为磁场强度矢量, 单位是安/米;

$\vec{D}$  为电通密度矢量, 单位是库/米<sup>2</sup>;

$\vec{B}$  为磁通密度矢量, 单位是韦/米<sup>2</sup>;

$\vec{J}$  为电流密度矢量, 单位是安/米<sup>2</sup>;

$\rho$  为电荷密度, 单位是库/米<sup>3</sup>;

$\varepsilon$  为媒质的介电常数, 单位是法/米;

$\mu$  为媒质的磁导率, 单位是亨/米;

$\sigma$  为媒质的电导率, 单位是西/米;

$\omega = 2\pi f$ , 是电磁场的角频率。

在自由空间,  $\varepsilon = \varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi \times 9 \times 10^9}$  法/米,  $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  亨/米。

如果在麦氏方程中引入磁流和磁荷的概念, 则(1-2-3)式变为:

$$\left. \begin{aligned} \text{I)} \quad \nabla \times \vec{H} - \vec{J} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ \text{II)} \quad \nabla \times \vec{E} = -\vec{J}_m - \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \\ \text{III)} \quad \nabla \cdot \vec{E} = \rho / \varepsilon \\ \text{IV)} \quad \nabla \cdot \vec{H} = \rho_m / \mu \end{aligned} \right\} \quad (1-2-5)$$

式中  $\vec{J}_m$  为磁流密度矢量;

$\rho_m$  为磁荷密度。

### 1.2.2 边界条件 里昂托维奇边界条件

在两种不同媒质的分界面上, 电磁场的边界条件的数学表示式为:

$$\left. \begin{aligned} \text{I)} \quad \vec{n}_{12} \times (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) &= \vec{J}_s \\ \text{II)} \quad \vec{n}_{12} \times (\vec{E}_2 - \vec{E}_1) &= 0 \\ \text{III)} \quad \vec{n}_{12} \cdot (\vec{D}_2 - \vec{D}_1) &= \rho_s \\ \text{IV)} \quad \vec{n}_{12} \cdot (\vec{B}_2 - \vec{B}_1) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-2-6)$$

在麦氏方程中引入磁流和磁荷后, 边界条件变为:

$$\left. \begin{aligned} \text{I)} \quad \vec{n}_{12} \times (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) &= \vec{J}_s \\ \text{II)} \quad \vec{n}_{12} \times (\vec{E}_2 - \vec{E}_1) &= \vec{J}_{ms} \\ \text{III)} \quad \vec{n}_{12} \cdot (\vec{D}_2 - \vec{D}_1) &= \rho_s \\ \text{IV)} \quad \vec{n}_{12} \cdot (\vec{B}_2 - \vec{B}_1) &= \rho_{ms} \end{aligned} \right\} \quad (1-2-7)$$

式中  $\vec{E}_1$ 、 $\vec{H}_1$ 、 $\vec{B}_1$ 、 $\vec{D}_1$  和  $\vec{E}_2$ 、 $\vec{H}_2$ 、 $\vec{B}_2$ 、 $\vec{D}_2$  分别为媒质 1 和 2 中的电磁场矢量;

$\vec{J}$  是分界面上的面电流密度矢量;

$\rho_s$  是分界面上的面电荷密度;

$\vec{J}_m$  是分界面上的面磁流密度矢量;

$\rho_m$  是分界面上的面磁荷密度;

$\vec{n}_{12}$  是分界面上的单位法线矢量, 其方向是从媒质 1 指向媒质 2。

如果媒质 1 是理想导体( $\sigma_1 = \infty$ ), 则  $\vec{E}_1$ 、 $\vec{H}_1$ 、 $\vec{B}_1$ 、 $\vec{D}_1$  均等于零。于是 (1-2-6) 式简化为:

$$\left. \begin{array}{l} \text{I) } \vec{n}_{12} \times \vec{H}_2 = \vec{J}_s \\ \text{II) } \vec{n}_{12} \times \vec{E}_2 = 0 \\ \text{III) } \vec{n}_{12} \cdot \vec{D}_2 = \rho_s \\ \text{IV) } \vec{n}_{12} \cdot \vec{B}_2 = 0 \end{array} \right\} \quad (1-2-8)$$

为了便于理解和应用, 边界条件往往写成以下形式:

$$\left. \begin{array}{l} \text{I) } H_{2t} = H_{1t} = J_s \\ \text{II) } E_{2n} = E_{1n} \\ \text{III) } D_{2n} - D_{1n} = \rho_s \\ \text{IV) } B_{2n} = B_{1n} \end{array} \right\} \quad (1-2-9)$$

(即注  $t$  代表切线分量,  $n$  代表法线分量)

昂昂托维奇边界条件的数学表示式为:

$$\vec{n} \times \vec{E}_{2s} = -Z_{w1} \vec{n} \times (\vec{n} \times \vec{H}_{2s}) \quad (1-2-10)$$

式中  $\vec{E}_{2s}$  和  $\vec{H}_{2s}$  为媒质 2 内  $S$  面上的总场量;

$\vec{n}$  是沿分界面  $S$  的法线方向(从媒质 1 指向媒质 2)的单位矢量;

$Z_{w1} = \sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}}$  是媒质 1 内的波阻抗。

### 1.2.3 乌莫夫-坡印亭定理

这个定理的数学表示式分别用微分式和积分式表述如下:

微分式

$$\nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) + \vec{E} \cdot \vec{J} = -\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\epsilon E^2}{2} + \frac{\mu H^2}{2} \right) \quad (1-2-11)$$

积分式

$$\oint_S \vec{n} \cdot \vec{S} ds + \int_V \vec{E} \cdot \vec{J} dv = -\frac{\partial}{\partial t} \int_V \left( \frac{\epsilon E^2}{2} + \frac{\mu H^2}{2} \right) dv \quad (1-2-12)$$

式中  $\left( \frac{\epsilon E^2}{2} + \frac{\mu H^2}{2} \right)$  是单位体积中电磁场的总能量;

$-\frac{\partial}{\partial t} \int_V \left( \frac{\epsilon E^2}{2} + \frac{\mu H^2}{2} \right) dv$  是在体积  $V$  中单位时间内电磁场能量的减少量;

$\int_V \vec{E} \cdot \vec{J} dv$  是在体积  $V$  中单位时间内消耗的能量;

$\oint_S \vec{n} \cdot \vec{S} ds$  是在单位时间内从体积  $V$  里向周围空间辐射的能量。

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (1-2-13)$$



$\vec{S}$  称为乌莫夫-坡印廷矢量, 它代表单位时间内通过单位面的电磁能量。

### 1.2.4 麦克斯韦方程的解

求解天线的辐射场时一般都把它分成两个独立的问题。第一个问题是决定源的(天线上)电流和电荷的振幅和相位的分布或者是决定一个包围源的封闭面上的场的振幅和相位分布; 第二个问题是根据给定了源的电流分布或者根据包围源的封闭面上的分布来决定空间场。第一个问题一般都用近似法求解, 并且根据不同型式的天线采用不同的近似处理; 第二个问题则根据麦克斯韦方程可以严格地解出。麦氏方程的各种解法可参阅文献[1]。这里只列出与求解天线辐射场有关的通解。

#### 1. 已知电流和电荷分布, 求无源区域内的电磁场

(1) 标量电位和矢量磁位的方法 由标量电位和矢量磁位代入以下二式即可求得场量  $\vec{E}$  和  $\vec{H}$ :

$$\vec{E} = -\nabla\varphi - j\omega\vec{A} \quad (1-2-14)$$

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu}\nabla\times\vec{A} \quad (1-2-15)$$

式中  $\varphi$  是标量电位, 由下式表示:

$$\varphi = \int_V \frac{\rho e^{-j\omega r}}{r} dV \quad (1-2-16)$$

$\vec{A}$  是矢量磁位, 由下式表示:

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \int_V \frac{\vec{J} e^{-j\omega r}}{r} dV \quad (1-2-17)$$

由于  $\nabla\cdot\vec{A} = -j\omega\epsilon\mu\varphi$ ,  $\varphi$  可用  $\vec{A}$  来表示。所以, 只要由 (1-2-17) 式求得  $\vec{A}$ , 即可由以下二式求电磁场:

$$\vec{E} = -\frac{j\omega}{\epsilon}\nabla(\nabla\cdot\vec{A} - j\omega\vec{A}) \quad (1-2-18)$$

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu}\nabla\times\vec{A} \quad (1-2-19)$$

对于线形天线, 需要研究的是简谐振动的线电流, 这时  $\vec{A}$  变为:

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \int_L \frac{\vec{I} e^{j(\omega t - \omega r)}}{r} dl \quad (1-2-20)$$

式中  $\vec{I}$  是线电流密度矢量。

(2) 麦氏方程的直接积分法 由此法求得电磁场的表示式为:

$$\vec{E}_p = -\frac{1}{4\pi} \int_V \left( j\omega\mu\psi \vec{J} - \frac{\rho}{\epsilon} \nabla\psi \right) dV \quad (1-2-21)$$

$$\vec{H}_p = \frac{1}{4\pi} \int_V \vec{J} \times \nabla\psi dV \quad (1-2-22)$$

式中  $\vec{E}_p$  和  $\vec{H}_p$  是无源区域内  $P$  点的电场和磁场;

$$\psi = e^{-j\omega r}/r$$

(1-2-21)和(1-2-22)式的结果与(1-2-14)和(1-2-15)式的结果是一致的。