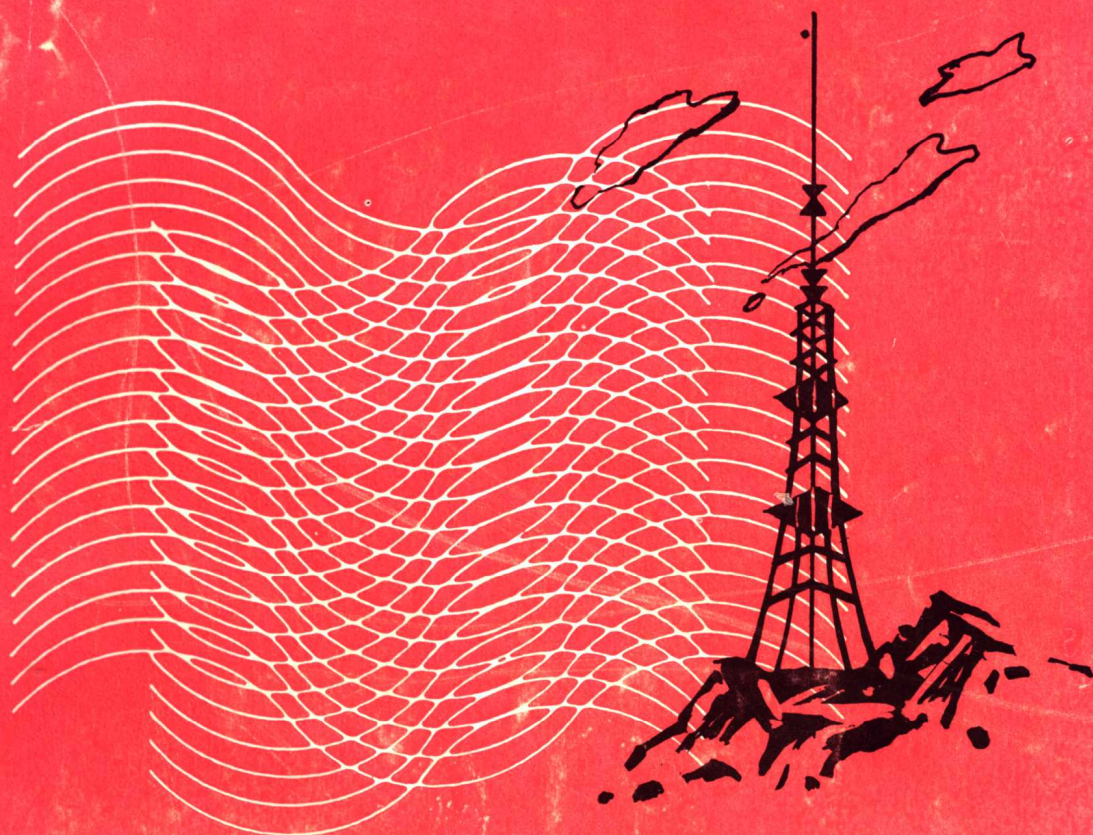




**GH**

高等学校工科电子类教材



# 天线与电波

● 周朝栋 王元坤 杨恩耀

● 西安电子科技大学出版社

高等学校工科电子类教材

# 天线与电波

周朝栋 王元坤 杨恩耀

西安电子科技大学出版社

1994

(陕)新登字 010 号

## 内 容 简 介

本书由工科电子类专业有关教材编审委员会评选审定并推荐出版。

全书共五章,前四章的内容为天线基础知识(基本元的辐射、天线电参数、接收天线、自由空间对称振子、天线阵理论、导电平面对邻近天线的影响、匹配与平衡—不平衡变换等),常用线状天线,缝隙与微带天线,常用面状天线等,对具体天线,侧重讨论其工作原理、基本性能、尺寸的选择与设计。第五~八章介绍电波传播的基础知识,侧重介绍几种常用的传播方式,结合其适用的频段,讨论其传播特点及其规律,并简要地介绍了场强计算的一般方法。书末附有习题。

本书适用对象为电子工程、通信工程等专业的大学本科学生,也可供其它专业选用和通信及天线工程技术人员参考。

高等学校工科电子类教材

### 天线与电波

周朝栋 王元坤 杨恩耀

责任编辑 李惠萍

---

西安电子科技大学出版社出版

西安电子科技大学印刷厂印刷

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

开本 787×1092 1/16 印张 20 8/16 字数 487 千字

1994年11月第1版 1994年11月第1次印刷 印数 1—2 000

---

ISBN 7 - 5606 - 0327 - 0/TN · 0085(课) 定价:11.60元

## 出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定，我部承担了全国高等学校和中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978~1990，已编审、出版了三个轮次教材，及时供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神，“以全面提高教材质量水平为中心，保证重点教材，保持教材相对稳定，适当扩大教材品种，逐步完善教材配套”，作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想，组织我部所属的九个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会，在总结前三轮教材工作的基础上，根据教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1991~1995年的“八五”（第四轮）教材编审出版规划。列入规划的，以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300多种。这批教材的评选推荐和编审工作，由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿，其一是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的，其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的，其三是经过质量调查在前几轮组织编定出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会（小组）、教学指导委员会和有关出版社，为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和不足之外，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评和建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

机械电子工业部电子类专业教材办公室

## 前 言

本教材系按机械电子工业部的工科电子类专业教材 1991~1995 年编审出版规划,由《电磁场与微波技术》教材编审委员会《天线与电波》编审小组征稿并推荐出版。责任编辑为赵姚同教授。

本教材由苏州大学周朝栋担任主编,上海交通大学赵姚同担任主审。

本教材的参考学时数为 72 学时,主要供电子工程、通信工程等大学本科专业学生使用。其主要内容包括天线的基本概念、基本分析方法、常用天线的基本性能和无线电波的主要传播方式、传播特点及其规律,影响因素及传输特性的估算等。

全书共分两大篇:第一篇为天线的基本理论与常用天线。本篇在讨论了天线基础知识的基础上,介绍了常用的线状天线、缝隙与微带天线和常用的面状天线的性能及工程设计方法;第二篇为电波传播部分,介绍了无线电波传播的基本概念,侧重讨论了在微波接力通信、移动通信、卫星通信中电波传播的有关知识及信道估算,对其它传播方式仅作简要介绍。在编写中,尽可能舍去了一些繁杂冗长的数学公式的推导,书末附有习题。

在使用本教材时,应根据各不同专业的要求有所侧重,主要要求学生熟悉天线与电波传播的基本理论以及掌握常用天线电波的主要传播方式和基本特性,学会工程设计的基本方法。有条件的院校可组织学生参观一些大型通信台站及其天线场或结合电视教育,以增进感性知识。

本教材由周朝栋编写第一、二章,杨恩耀编写第三章(部分)及第四章,王元坤编写第五~八章及第三章,周朝栋统编全稿。参加审阅工作的还有谢处方、汪茂光、林炽森、肖景明、单秋山等教授,他们都为本书提出许多宝贵意见,这里表示诚挚的感谢。由于编者水平以及编写时间的限制,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者指正。

# 目 录

## 第一篇 天 线

第一章 天线基础知识 .....	1	二、感应电动势法及耦合振子的互阻抗 ...	53
§ 1-1 概述 .....	1	三、天线阵的总辐射阻抗、方向系数与耦合 对称振子的输入阻抗 .....	58
§ 1-2 基本元的辐射 .....	2	四、无源振子、反射器与引向器 .....	60
一、电基本振子的辐射 .....	3	§ 1-8 导电平面对邻近天线性能的影响 .....	61
二、对偶性原理与磁基本振子 .....	7	一、无限大理想导电平面对天线 性能的影响 .....	61
三、小环天线与基本缝隙元 .....	9	二、理想导电地面上的垂直接地天线 .....	64
四、等效原理与基本面元 .....	11	三、有限导电率地面对天线性能的影响 ...	65
§ 1-3 发射天线的电参数 .....	13	四、有限尺寸金属面上的直立天线 .....	67
一、效率 .....	14	§ 1-9 折合振子、匹配与平衡 - 不平衡变换 .....	69
二、输入阻抗 .....	14	一、折合振子 .....	69
三、方向图、主瓣宽度与旁瓣电平 .....	15	二、匹配技术与平衡 - 不平衡变换器 .....	72
四、方向系数 .....	16	第二章 线状天线 .....	79
五、极化 .....	17	§ 2-1 水平对称天线 .....	79
六、有效长度 .....	18	一、水平对称振子 .....	79
七、增益系数 .....	18	二、宽频带对称振子 .....	82
八、工作频带宽度 .....	19	三、V型对称振子 .....	87
九、功率容量 .....	20	四、蝙蝠翼振子 .....	89
§ 1-4 接收天线 .....	20	五、水平全向天线 .....	90
一、用互易定理分析接收天线 .....	21	§ 2-2 直立天线 .....	92
二、接收天线的等效电路与电参数 .....	24	一、垂直接地天线的加载 .....	92
三、接收天线的噪声温度 .....	26	二、螺旋鞭天线 .....	99
四、弗里斯(Friis)传输公式 .....	29	三、套筒天线 .....	103
§ 1-5 自由空间的对称振子 .....	30	四、其它直立天线 .....	105
一、对称振子的电流分布 .....	30	五、盘锥天线 .....	109
二、对称振子的辐射场与方向性 .....	32	§ 2-3 环天线 .....	110
三、对称振子的辐射功率、辐射阻抗 和方向系数 .....	34	一、小环天线 .....	110
四、对称振子的输入阻抗 .....	37	二、电流为驻波分布的大环 .....	112
§ 1-6 天线阵的方向性 .....	40	三、加载圆环天线 .....	117
一、二元阵与方向图乘积定理 .....	40	§ 2-4 行波单导线及菱形天线 .....	118
二、均匀直线阵 .....	43	一、行波单导线的辐射 .....	118
三、均匀直线边射阵与端射阵 .....	45	二、菱形天线 .....	120
四、非均匀等间距直线阵 .....	49		
§ 1-7 天线阵的阻抗 .....	51		
一、耦合振子的等效电路及阻抗 .....	51		

三、V形和其它形式的菱形天线 .....	125	§ 4-1 基本原理与基本公式 .....	181
§ 2-5 引向天线 .....	127	§ 4-2 口面辐射特性的一般分析 .....	184
一、引向天线的电参数 .....	128	一、口面场均匀分布的矩形口面 .....	184
二、引向天线的尺寸选择 .....	129	二、口面场振幅沿 $x$ 轴余弦分布	
三、环形元引向天线与背射天线 .....	131	的矩形口面 .....	186
§ 2-6 宽频带天线 .....	132	三、口面场均匀分布的圆形口面 .....	188
一、平面螺旋天线 .....	133	四、口面场锥削的圆形口面 .....	189
二、对数周期天线 .....	135	五、非同相口面场对辐射的影响 .....	191
§ 2-7 圆极化天线 .....	144	§ 4-3 抛物面天线 .....	192
一、螺旋天线的工作原理 .....	145	一、抛物面的几何关系式和	
二、螺旋天线的电参数的估算及其		几何光学性质 .....	193
设计调整 .....	147	二、口面场分布 .....	194
三、圆锥形螺旋天线及其它 .....	149	三、方向性 .....	196
<b>第三章 缝隙天线与微带天线</b> .....	152	四、照射器 .....	202
§ 3-1 缝隙天线 .....	152	五、抛物面天线中的若干技术问题 .....	210
一、理想缝隙天线 .....	152	§ 4-4 卡塞格伦天线 .....	214
二、有限尺寸金属平面上缝隙的辐射 .....	154	一、工作原理 .....	214
三、矩形波导缝隙天线阵 .....	155	二、卡塞格伦天线的分析方法 .....	215
四、圆柱体表面上缝隙天线阵 .....	164	三、照射器 .....	217
§ 3-2 微带天线 .....	167	四、卡塞格伦天线的主要优点 .....	218
一、微带天线的基本分析方法 .....	167	§ 4-5 扇形波束天线 .....	219
二、矩形微带天线 .....	168	一、切割抛物面天线 .....	219
三、其它形式的微带天线 .....	172	二、抛物柱面天线 .....	221
四、微带天线的馈电方法 .....	178	<b>天线部分基本练习题</b> .....	222
<b>第四章 面状天线</b> .....	181		

## 第二篇 电波传播

<b>第五章 电波传播的基础知识</b> .....	229	§ 6-2 地波传播特性 .....	239
§ 5-1 概述 .....	229	一、地波传播时场的结构 .....	240
§ 5-2 自由空间电波传播 .....	230	二、地波传播特性 .....	242
§ 5-3 传输媒质对电波传播的影响 .....	231	§ 6-3 地波场强计算 .....	242
一、传输损耗 .....	231	§ 6-4 地面不均匀性对地波传播	
二、衰落 .....	232	的影响 .....	246
三、传输失真 .....	233	<b>第七章 天波传播</b> .....	249
四、电波的折射、反射与绕射现象 .....	234	§ 7-1 电离层 .....	249
§ 5-4 干扰与噪声 .....	234	一、电离层的结构特点 .....	249
一、信道模型的一般表示式 .....	234	二、电离层的变化 .....	250
二、电磁噪声的分类及表述方法 .....	235	三、电离层的介电性质 .....	251
<b>第六章 地波传播</b> .....	238	§ 7-2 无线电波在电离层中的传播 .....	253
§ 6-1 地球表面的电特性 .....	238	一、反射条件 .....	253

二、电离层的吸收 .....	256	五、大气噪声 .....	288
§ 7 - 3 短波天波传播 .....	256	§ 8 - 4 超短波传播 .....	290
一、传输模式 .....	257	一、光滑地面上的亮区场 .....	290
二、传输特性 .....	257	二、光滑球面地上的电波绕射 .....	293
三、短波传播的基本特点 .....	264	三、山峰绕射 .....	298
§ 7 - 4 中波传播 .....	265	四、地面移动通信电波传播基本特点 .....	301
<b>第八章 视距传播</b> .....	267	§ 8 - 5 微波中继系统的电波传播 .....	303
§ 8 - 1 自由空间电波传播的非涅尔区 ...	267	一、传播余隙的选择与确定 .....	303
一、菲涅尔区 .....	267	二、衰落 .....	305
二、传播主区的概念 .....	270	三、去极化现象 .....	309
§ 8 - 2 地面对电波传播的影响 .....	270	四、微波衰减与散射 .....	309
一、视线距离 .....	271	§ 8 - 6 卫星通信系统中的电波传播 .....	309
二、地面反射的影响 .....	271	一、传输损耗 .....	310
三、球面地的凸起高度及传播余隙 .....	277	二、去极化现象 .....	313
§ 8 - 3 低空大气层对电波传播的影响 ...	279	三、大气折射与对流层闪烁 .....	314
一、大气对电波的折射作用 .....	279	四、电离层闪烁 .....	315
二、大气吸收 .....	282	<b>电波传播部分基本练习题</b> .....	317
三、降雨影响 .....	283	<b>参考文献</b> .....	320
四、云、雾引起的衰减 .....	288		



---

---

# 第一篇 天 线

---

---

## 第一章 天线基础知识

### § 1-1 概 述

在无线电通信、广播电视以及雷达、导航等工程系统中，均需利用无线电波来传递信息以完成整个系统的工作，天线是这些系统中用以辐射或接收无线电波的部件。

天线的基本功能是将由发射机(或传输线)送来的高频电流(或导波)能量转变为无线电波并传送到空间；在接收端，则将空间传来的无线电波能量转变为向接收机传送的高频电流(或导波)能量。因此，天线可认为是导波和辐射波的变换装置，是一个能量转换器件。

为了有效地将能量馈送到天线上，在馈线末端的的天线所呈现的阻抗，应满足匹配要求，故它是一终端匹配器件；为了有效地利用天线辐射的功率或提高天线系统的信噪比，天线应具有向所需方向辐射或接收所需方向无线电波的能力，即定向辐射或接收，因此，天线又是一个聚焦照射或接收器件；天线极化通常定义为：在最大辐射方向上电场矢量的取向随时间的变化规律，可分为直线极化、圆极化与椭圆极化。在同一系统中收、发天线应具有同一极化形式，若不一致，则产生极化失配，将降低传输效率，这样，天线又是一个极化器件。几乎在所有情况下，天线都具有上述器件的功能。此外，天线还可能具有扫描器件，数据处理器件等功能。

众所周知，时变电流能辐射电磁波，因而称为辐射源。但要产生有效的辐射或接收，它的结构应当是一个开放系统。在图 1-1-1 中的(a)、(b)和(c)分别是终端开路、短路和端接特性负载的平行双导线。由于两根线之间的距离远小于工作波长，其对应线段  $ab$  和  $a'b'$  上电流的振幅相等，但相位相差  $180^\circ$ 。因此，它们在距此线段较远的空间任一点处产生的场彼此相抵消，电磁能量主要被束缚在双导线的附近区域，因而这是一保守系统，不能用作天线。但若将两线张开成如图 1-1-1 中(d)、(e)和(f)的形式，对应两线段产生的场在某些方向上不再互相抵消，而是部分迭加或完全迭加了，这样就构成一个开放系统，它们依次被称为对称振子、环形天线和菱形天线。关于这些天线，我们将在后续章节中加以介绍。

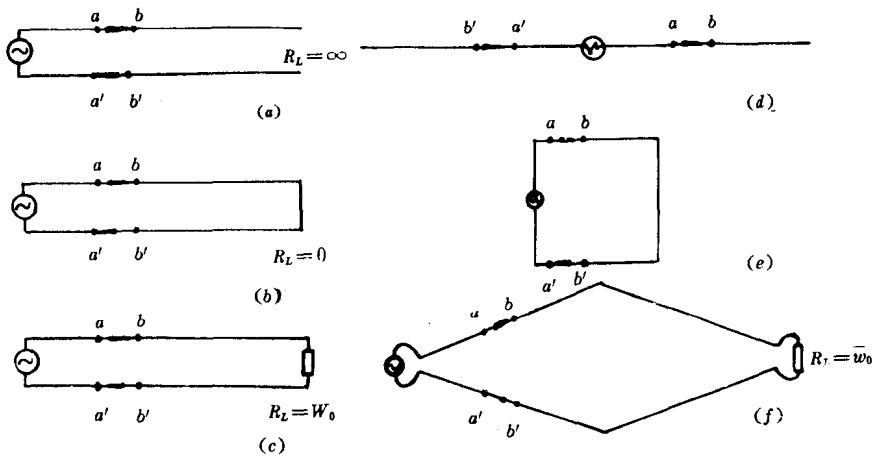


图 1-1-1 将平行传输线张开成天线

(a) 开路线; (b) 短路线; (c) 行波双导线; (d) 对称振子; (e) 环形天线; (f) 菱形天线

为了适应各种不同用途的需要,人们研制和设计出各种类型的天线,对于这些天线,可以从不同角度来分类,例如说可依照工作波段、用途、极化形式等等来分类。若按工作性质分则可分为接收天线和发射天线。一般天线都具有可逆性,即同一副天线既可作为接收天线,也可作为发射天线。由于使用的场合不同,对天线的要求也有所不同。例如,发射天线需考虑功率容量问题,而接收天线则需考虑噪声问题,因此,在设计中各有所侧重。从便于分析和讨论天线性能出发,一般可按天线的结构形式分成两大类,一类是导线或金属棒构成的天线,称为线状天线或线天线,另一类则类似声学或光学设备由金属面或介质面构成的天线,称为面状天线或面天线。

目前,人类社会进入了一个以信息急剧膨胀为主要特征的新阶段。在信息技术、计算技术和空间技术等方面都取得了迅猛的发展,这也促进了天线技术的发展。例如,大容量电子计算机的研制成功,在天线理论和设计上成功地得到应用,解决了过去不能解决或难以解决的大量天线问题;人造卫星和洲际导弹的研究成功,对天线提出了一系列新课题,促进了多种新型天线的诞生。

本书的内容,在天线方面主要介绍天线基本理论以及最常用的典型天线的工作原理与电特性,尽可能避免繁琐的数学推导,强调实用性,内容虽侧重在通信天线,也简要介绍了其它应用场合的天线,如广播电视天线、雷达天线等。在学习中务必掌握重点。

## § 1-2 基本元的辐射

无论是线天线或面天线都可分割为无限多个基本元,在这些基本元上载有交变电流(或磁流)或交变的电流和磁流。在每一个基本元上的电磁流的振幅、相位和方向均假设是相同的。某一具体天线则由这些基本元按一定的结构形式拼接而成。当然,各个元上的电磁流的振幅、相位和方向可能是不相同的,具体的分布形式由天线的几何形状、尺寸以及激励条件而定。如果我们掌握了基本元的辐射特性,则可按电磁场的叠加原理,考虑到各

个元上电磁流的振幅、相位和方向在空间的分布,则可得出各类天线的辐射特性。

基本元的类型可以分成三类,第一类为电流元,元上载有交变电流,又称为电基本振子;第二类为磁流元,元上载有交变磁流。正如在“电磁场理论”课程中所介绍的,在某些场合引入磁流的概念将给我们很大方便。本节将介绍电磁场对偶性原理,依据此原理,磁基本振子的辐射场可从电基本振子的辐射场对应地得出;第三类为面基本元,简称面元,依据经典波动光学的惠更斯-菲涅尔原理,空间任意一点  $M$  处的场,是包围天线的封闭曲面上各点电磁扰动所产生的次辐射在  $M$  点的迭加结果。由此,对某一面天线而言,可以认为是由金属面和开口面构成的一完整的封闭面,金属面外表面上的场为零。因此,只要知道开口面上的场的分布情况,就可求出空间任意一点的场。同理,可以将开口面分割成许多小面元,知道面元的辐射就可依据整个开口面场的分布情况求出此天线的辐射特性。本节我们还将介绍电磁场的等效原理。依据等效原理,可以将面元上的磁场和电场分别用等效电流元和等效磁流元来代替,这样就可用电基本振子和磁基本振子的结果而得出面元的辐射特性。如上所述,下面依次介绍这三类基本元的辐射。

### 一、电基本振子的辐射

电基本振子是一段载有高频电流的细导线,其长度  $l$  远小于工作波长  $\lambda$ ,即  $l \ll \lambda$ ,沿振子各点电流的振幅和相位均相同(等幅同相分布),参见图 1-2-1。在“电磁场理论”课程中,已给出了在球坐标原点沿  $z$  轴放置的电基本振子在各向同性理想均匀无限大自由空间时的场的表示式,即

$$\left. \begin{aligned} E_r &= \frac{I_A l}{4\pi \omega \epsilon_0} \cos \theta \left( -\frac{j}{r^3} + \frac{k}{r^2} \right) e^{-jkr} \\ E_\theta &= \frac{I_A l}{4\pi \omega \epsilon_0} \sin \theta \left( -\frac{j}{r^3} + \frac{k}{r^2} - \frac{jk^2}{r} \right) e^{-jkr} \\ E_\varphi &= 0 \\ H_r &= H_\theta = 0 \\ H_\varphi &= \frac{I_A l}{4\pi} \sin \theta \left( \frac{1}{r^2} + \frac{jk}{r} \right) e^{-jkr} \end{aligned} \right\} \quad (1-2-1)$$

式中  $r$  为坐标原点至观察点  $M$  的距离,  $\theta$  为射线  $OM$  与振子轴(即  $z$  轴)之间的夹角,  $\varphi$  为  $OM$  在  $xy$  平面上的投影  $OM'$  与  $x$  轴之间的夹角,自由空间媒质的介电系数  $\epsilon = \epsilon_0 = 10^{-9}/36\pi \text{ F/m}$ ,相移常数  $k=2\pi/\lambda_0$ ,  $\lambda_0$  为自由空间波长。式(1-2-1)中电磁场各分量均为复振幅,如需写出它们的瞬时值,应乘以因子  $e^{j\omega t}$ ,然后取其实部。式中  $E$  的单位是  $\text{V/m}$ ,  $H$  的单位是  $\text{A/m}$ ,下标  $r, \theta, \varphi$  表示球坐标系中的各分量,  $I_A$  是振子上的电流,单位是  $\text{A}$ 。

从式(1-2-1)可以看出,电场仅有  $E_r$  和  $E_\theta$  分量,磁场仅有  $H_\varphi$  分量,电场和磁场是相互垂直的。从中还可看出每个分量均由  $n$  项组成,各项随距离的变化分别与  $r^{-1}$ 、 $r^{-2}$  和  $r^{-3}$  成比例。图 1-2-2 示出了  $E_\theta$  的这三项随  $kr$  的变化曲线。根据距离的远近,可以将电基本振子的场分为三个区域来讨论,即  $kr \ll 1$  的近区、 $kr \gg 1$  的远区和两者之间的中间区。

#### (一) 近区场

由  $kr \ll 1$ ,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  可知近区场系指  $r \ll \lambda/2\pi$  的区域,在此区域,和  $r^{-2}$  及  $r^{-3}$  项相比,  $r^{-1}$

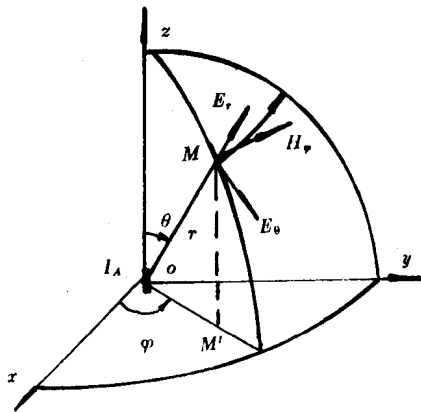


图 1-2-1 电基本振子与球坐标系

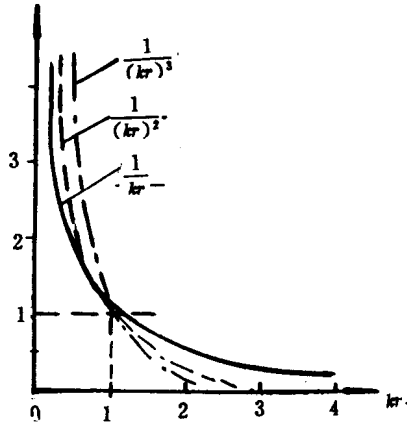


图 1-2-2 电基本振子  $E_\theta$  的三项随  $kr$  的变化曲线

项可忽略, 可认为  $e^{-jkr} \approx 1$ 。这样近区场的表示式可简化为

$$\left. \begin{aligned} H_\phi &= \frac{I_A l}{4\pi r^2} \sin \theta \\ E_r &= -j \frac{I_A l}{4\pi r^3} \frac{2}{\omega \epsilon_0} \cos \theta \\ E_\theta &= -j \frac{I_A l}{4\pi r^3} \frac{2}{\omega \epsilon_0} \sin \theta \\ H_r &= H_\phi = E_\phi = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-2-2)$$

不难看出, 上述表示式和稳态场的公式完全相符,  $E_r$  和  $E_\theta$  与静电场问题中电偶极子的电场相似, 而  $H_\phi$  和恒定电流元的磁场相似。因此, 近区又称为似稳区。分析式(1-2-2)可看出

(1) 场随距离  $r$  的增大而迅速减小;

(2) 电场滞后于磁场  $90^\circ$ , 因而坡印廷矢量是虚数, 每周平均辐射的功率为零。这一现象可以这样来解释, 因电基本振子可以看成是由很短的平行双导线展开而成的, 具有很大的容抗, 电动势滞后于电流接近  $90^\circ$ , 因此电场滞后于磁场  $90^\circ$ 。在此区域电磁能量在源和场之间来回振荡, 在一个周期内, 场源供给场的能量等于从场返回到场源的能量, 故而没有能量向外辐射, 这种场称为感应场。

(二) 远区场

在  $kr \gg 1$  的区域, 电磁场主要由  $r^{-1}$  项决定,  $r^{-2}$  和  $r^{-3}$  项可忽略, 由此可得

$$\left. \begin{aligned} E_\theta &= j \frac{60\pi I_A l}{Ar} \sin \theta e^{-jkr} \\ H_\phi &= j \frac{I_A l}{2Ar} \sin \theta e^{-jkr} \\ E_r &\approx 0 \\ H_r &= H_\theta = E_\phi = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-2-3)$$

由式(1-2-1)得出上式时, 曾代入  $k^2 = \omega^2 \epsilon_0 \mu_0$ ,  $\omega = 2\pi f = 2\pi c / \lambda$ ,  $c$  为光速等于  $3 \times 10^8$  m/s。

分析式(1-2-3),可看出

(1) 仅有  $E_\theta$  和  $H_\phi$  两个分量,两者在空间互相垂直并与  $r$  矢径方向垂直。三者构成右手螺旋系统。场强与  $r^{-1}$  成正比,这是由扩散引起的。

(2)  $E_\theta$  和  $H_\phi$  两者在时间上同相,其坡印廷矢量  $p = \frac{1}{2} E \times H^*$  是实数,为有功功率且指向  $r$  的增加方向上。

(3)  $E_\theta$  与  $H_\phi$  的比值即  $E_\theta/H_\phi = 120\pi$ ,是一个实数,它具有阻抗的量纲,称为波阻抗,用  $\eta_0$  来表示。既然两者的比值为一常数,故只需讨论两者之一就可以了,例如讨论  $E_\theta$ ,由  $E_\theta$  就可得出  $H_\phi$ 。

(4) 从上述讨论可知,电基本振子在远区的场是一沿着径向向外传播的横电磁波。电磁能量离开场源向空间辐射,不再返回,这种场称为辐射场。然而,在不同  $\theta$  方向上,它的辐射强度是不同的,在  $\theta$  等于  $0^\circ$  和  $180^\circ$  方向上,即振子轴的方向上辐射为零,而在通过振子中心并垂直于振子轴的方向上,即  $\theta=90^\circ$  方向辐射最强。以上说明远区辐射场是有方向性的,其辐射的空间模型如图 1-2-3(a) 所示。

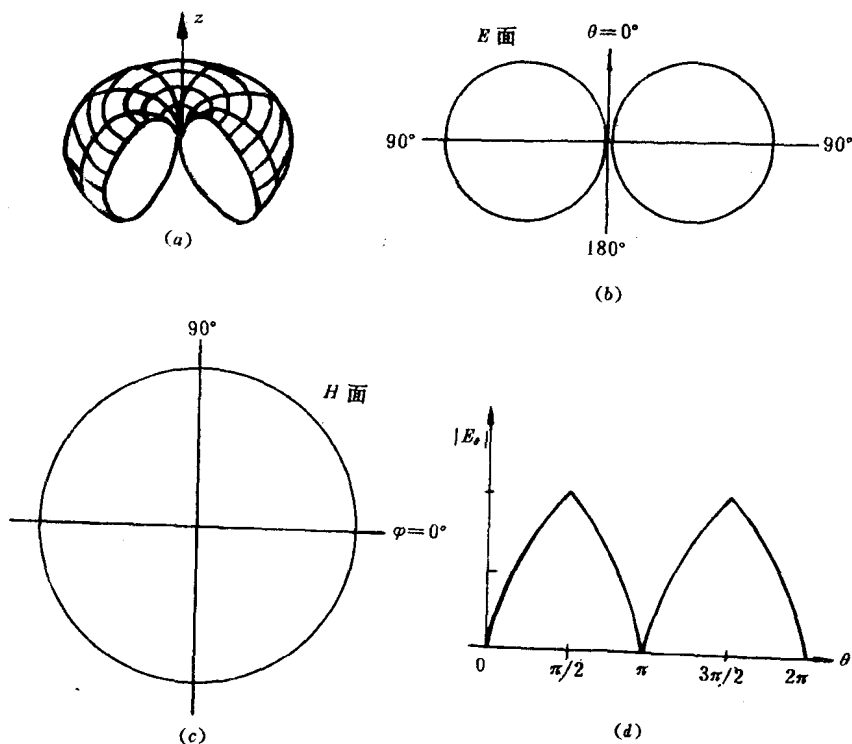


图 1-2-3 电基本振子的方向性

- (a) 方向图的立体模型; (b) E 面方向图;  
 (c) H 面方向图; (d) E 面直角坐标方向图

在天线特性的表述中,我们需要了解天线辐射场在空间不同方向上的分布情况,也就是指在离天线相同距离不同方向上,天线辐射场的相对值与空间方向的关系,称此为天线的方向性。将方向性用图形描绘出来,称为方向图。当然,要在纸平面上绘出三维空间的

这种图形是不方便的，一般只绘出两个互相垂直的典型平面的方向图也就可以联想出场在空间分布的大致情况了。对电基本振子而言，一个是与振子轴垂直( $\theta=90^\circ$ )的平面，此平面是与磁场矢量平行的平面，称为  $H$  面，另一个是包含振子轴的平面( $\varphi=\text{常数}$ )，这个平面是与电场矢量平行的平面，称为  $E$  面。用极坐标绘出的电基本振子  $E$  面的方向图为 8 字形， $H$  面为一圆，分别如图 1-2-3(b)与(c)所示。图(d)为用直角坐标绘出的  $E$  面方向图。

(三) 中间区

介乎远区与近区之间的区域，称之中间区。显然在此区域内感应场与辐射场相差不大，都不能略而不计。根据式(1-2-1)可得出感应场与辐射场之比为

$$C_0 = \frac{1/r}{1/\frac{\lambda}{2\pi}} = \frac{\lambda}{2\pi r} \quad (1-2-4)$$

或

$$C_0 = 20 \lg \left( \frac{\lambda}{2\pi r} \right) \text{ dB} \quad (1-2-5)$$

如果要求感应场比辐射场低于 30 dB，则距离  $r$  应大于或等于  $5\lambda$ ；若要求低于 36 dB，则距离  $r$  应大于或等于  $10\lambda$ 。在测试天线方向图时，因考虑的是远区场，即使对于这种电尺寸很小的天线，测试距离也应取  $(5\sim 10)\lambda$  以上。对于电尺寸比较大的天线，在选择测试距离时，除上述条件外还要考虑其它条件。

如果作一包围天线的封闭曲面，通过此闭合曲面的电磁波在时间上平均功率通量的总和就等于天线的辐射功率。显然，天线应位于无耗空间，在此闭合面内不应存在其它辐射源。同理，为避免感应场的影响，此闭合面应取在天线的远区。为了积分方便，通常取以振子为中心  $r$  足够大的一球面，如图 1-2-4 所示。

如上所述，辐射功率  $P_\Sigma$  的表示式为

$$P_\Sigma = \oiint_S \mathbf{p} \cdot d\mathbf{s} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \mathbf{p} \cdot d\hat{\mathbf{s}} r^2 \sin\theta d\theta d\varphi \quad (1-2-6)$$

式中  $\mathbf{p}$  为坡印廷矢量， $d\mathbf{s}$  为封闭面面元的单位矢，指向外法线方向，由

$$\mathbf{p} = \frac{1}{2} |\mathbf{E}| \cdot |\mathbf{H}| \hat{\mathbf{r}} = \frac{|\mathbf{E}|^2}{240\pi} \hat{\mathbf{r}} \quad (1-2-7)$$

式中， $|\mathbf{E}|$  和  $|\mathbf{H}|$  为电场和磁场的模值， $\hat{\mathbf{r}}$  为球坐标径向方向单位矢量。将式(1-2-7)代入式(1-2-6)得

$$P_\Sigma = \frac{1}{240\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi |\mathbf{E}|^2 r^2 \sin\theta d\theta d\varphi \quad (1-2-8)$$

上式是计算辐射功率的一般公式。对于电基本振子，将远区电场的模值代入并积分，得辐射功率为

$$P_\Sigma = 40 I_0^2 \left( \frac{\pi l}{\lambda} \right)^2 \quad (1-2-9)$$

显然， $I_0$  和  $l/\lambda$  愈大，则  $P_\Sigma$  愈大。

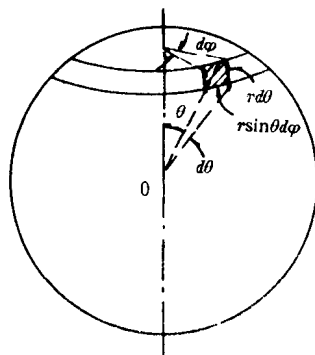


图 1-2-4 用坡印廷矢量法计算辐射功率

为了分析和计算方便,引入“辐射电阻”的概念,假想天线的辐射功率被一个“等效电阻”所吸收,这个等效电阻就称为辐射电阻。注意,这是一个虚构电阻,事实上并不存在这一电阻,更没有什么样的电流通过此电阻而吸收功率。辐射电阻  $R_{\Sigma}$  和辐射功率  $P_{\Sigma}$  之间的关系是

$$P_{\Sigma} = \frac{1}{2} I_A^2 R_{\Sigma} \quad (1-2-10)$$

或

$$R_{\Sigma} = 2P_{\Sigma}/I_A^2 \quad (1-2-11)$$

式中  $I_A$  是天线电流。应强调指出,除基本元外,其它天线上各不同位置的电流并不一定是等同的,究竟取什么位置的电流代入上式,亦即从辐射功率  $P_{\Sigma}$  (这是实有的)来计算辐射电阻(这是假想的)究竟取什么电流来归算,一般说采用输入电流  $I_0$  或驻波的波腹电流  $I_m$  来计算,分别称为归算于输入电流的辐射电阻  $R_{\Sigma 0}$  或归算于波腹电流的辐射电阻  $R_{\Sigma m}$ 。电基本振子各点的电流均为  $I_A$ , 其辐射电阻为

$$R_{\Sigma} = 80(\pi l/\lambda)^2 \quad (1-2-12)$$

## 二、对偶性原理与磁基本振子

如果描述物理现象的方程具有相同的数学形式,则其解也将具有相同的数学形式。此相同数学形式的方程称为对偶性方程,在方程中对应位置的量称为对偶量,得到一个方程的解就可写出另一个方程的解。这一原理称为对偶性原理,又称为二重性原理。

在麦克斯韦方程中,电和磁的现象是不对称的。磁通是处处连续的,因此,没有磁荷,也不存在磁流。但如果仅仅从计算着眼,将电磁场方程表示为对称形式,就可从电振子写出与之对应的磁振子的结果来。譬如说从电基本振子的结果写出磁基本振子的结果。

在引入磁荷和磁流的概念后,麦克斯韦方程则可写成对称形式,即

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H} &= \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mathbf{J}_A \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \mathbf{J}_M \\ \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= \rho_M \end{aligned} \right\} \quad (1-2-13)$$

式中,  $\mathbf{J}_M$  和  $\rho_M$  分别为磁流密度和磁荷密度。上式第二个方程的右端两项有负号,这是由于电流产生的磁场的方向是按右手螺旋定则定出的,而磁流产生的电场的方向与之相反,是按左手螺旋定则定出的。第二、四两个方程表明原来由电荷或电流产生的电磁场可用产生同样电磁场的等效磁荷和磁流来代替。

根据线性媒质中电磁场的叠加原理,可以将式(1-2-13)中的电磁场分解为电荷与电流产生的场  $\mathbf{E}_e$  和  $\mathbf{H}_e$  及磁荷与磁流产生的场  $\mathbf{E}_M$  和  $\mathbf{H}_M$  即

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{E} &= \mathbf{E}_e + \mathbf{E}_M \\ \mathbf{H} &= \mathbf{H}_e + \mathbf{H}_M \end{aligned} \right\} \quad (1-2-14)$$

它们分别满足麦克斯韦方程,即

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times H_e &= \varepsilon \frac{\partial E_e}{\partial t} + J_A \\ \nabla \times E_e &= -\mu \frac{\partial H_e}{\partial t} \\ \nabla \cdot D_e &= \rho \\ \nabla \cdot B_e &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-2-15)$$

和

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times H_M &= \varepsilon \frac{\partial E_M}{\partial t} \\ \nabla \times E_M &= -\mu \frac{\partial H_M}{\partial t} - J_M \\ \nabla \cdot D_M &= 0 \\ \nabla \cdot B_M &= \rho_M \end{aligned} \right\} \quad (1-2-16)$$

比较上述的两组方程, 可见它们完全对称, 共对偶量分别为  $E_e$  和  $H_M$ 、 $H_e$  和  $-E_M$ 、 $J_A$  和  $J_M$ 、 $\rho$  和  $\rho_M$  以及  $\varepsilon$  和  $\mu$ 。如果电和磁两现象的边界条件也满足对偶原理, 则可用上述对偶量进行互换, 就能由一电荷和电流源的公式得出一磁荷和磁流源的公式, 或反之。如前所述, 我们已经从麦克斯韦方程求出电基本振子的解, 只需应用对偶原理将对偶量一一代换就可得出磁基本振子的解, 当然, 两者的边界条件需满足对偶原理, 即同样应当是相对应的。

参见图 1-2-5, (a)和(b)分别表示置于原点尺寸相同的电基本振子和磁基本振子, 已知电基本振子辐射的磁场为

$$H_\varphi = j \frac{1}{2r\lambda} I_A l \sin \theta e^{-jkr} \quad (1-2-17)$$

则由对偶量置换可得出磁基本振子辐射的电场为

$$E_\varphi = -j \frac{1}{2r\lambda} I_M l \sin \theta e^{-jkr} \quad (1-2-18)$$

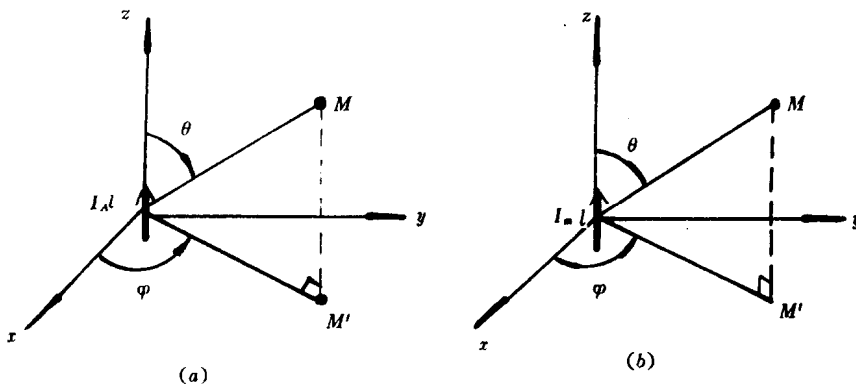


图 1-2-5 电基本振子和磁基本振子

(a) 电基本振子; (b) 磁基本振子

应当指出, 对磁基本振子来说与振子轴互相垂直的平面是  $E$  面, 其方向图是一圆, 包含振子轴的平面是  $H$  面, 其方向图是 8 字形。



## 三、小环天线与基本缝隙元

## (一) 小环天线

由于实际上并不存在真正的磁基本振子, 但半径  $a \ll \lambda$  的小电流环可等效为一磁基本振子, 在图 1-2-6 中示出了一单匝小电流环, 环平面与  $xoy$  平面重合。环导线上载有均匀同相交变电流  $i = \text{Re}[Ie^{j\omega t}]$ , 由电磁场理论可知, 它的磁矩是

$$p_M = \mu_0 i s \hat{n} \quad (1-2-19)$$

式中:  $p_M$  为磁矩,  $s$  为小环的面积,  $\hat{n}$  为  $s$  面的单位矢, 与电流方向成右手螺旋关系。

与电基本振子对比, 小电流环可以认为是由一对等值异磁荷  $+q_m$  与  $-q_m$  组成, 磁偶极矩为

$$p_M = q_m l \quad (1-2-20)$$

式中,  $l$  为  $+q_m$  与  $-q_m$  间的距离, 即等效磁基本振子的长度。由式(1-2-19)和式(1-2-20)可得

$$q_m = \frac{\mu_0 i s}{l} \quad (1-2-21)$$

则磁流为

$$i_M = \frac{dq_m}{dt} = \frac{\mu_0 s}{l} \frac{di}{dt} \quad (1-2-22)$$

略去时间因子, 则

$$I_M = j \frac{\omega \mu_0 s}{l} I \quad (1-2-23)$$

依据对偶原理, 在式(1-2-3)中用对偶量置换, 得小电流环的辐射场为

$$\left. \begin{aligned} E_\theta &= \frac{\omega \mu_0 s l k}{4\pi r} \sin \theta e^{-jkr} \\ H_\phi &= -\frac{s l k^2}{4\pi r} \sin \theta e^{-jkr} \\ E_r &= E_\phi = H_\theta = 0 \\ H_r &\approx 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-2-24)$$

由上式可知, 小电流环在环平面上是均匀辐射的, 方向图为一圆, 但在包含环轴的平面上, 方向图为 8 字形。从上式还可看出, 小电流环的辐射场与环的形状无关, 而与环包围的面积成正比。

小电流环的辐射功率和辐射电阻可仿效电基本振子用玻印廷矢量法求出, 其辐射电阻为

$$R_r = \frac{320\pi^4 s^2}{\lambda^3} \quad (1-2-25)$$

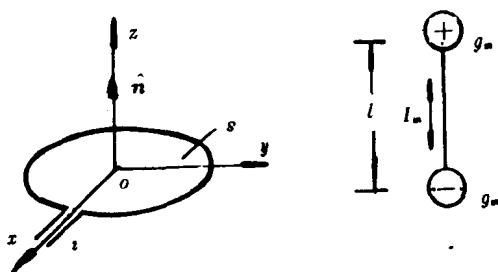


图 1-2-6 小电流环及其磁矩