

Dianbo^{YU} Tianxian
Dianbo^{YU} Tianxian

电波与天线

左智成 李兴华 等编著

合肥工业大学出版社

Dianbo

Antenna

电波与天线

第二版

作者：[美] 詹姆斯·R·坎农



Dianbo  YU
Tianxian
Dianbo
Tianxian

电波与天线

左智成 李兴华 等编著

合肥工业大学出版社

内 容 简 介

本书较全面地介绍了目前工程应用中几种常用天线的工作原理和各波段电磁波传输的方式及特点。全书共分七章,第一、二章主要介绍电波与天线基础知识;第三章讲述了中波、短波、超短波和微波波段电波传播的方式、技术特性;第四、五、六章介绍了常用线天线和面天线的结构特点、工作原理、辐射场特性、技术特点;第七章介绍天馈线的测试技术。

本书系作者多年教学成果总结,内容选取力求将传统天线与新型天线技术相结合,把中波、短波、超短波、微波、移动典型天线纳入其中;理论分析力求系统,一线牵连;语言表述方面力求通俗易懂,深入浅出;技术应用追求实用,通过典型案例说明电波传输与天线维护、设计中应考虑和注意的问题。

本书可作为高职高专院校无线电通信、电子信息工程、卫星通信、移动通信、广播电视发送技术专业学生的教材,也可供上述专业的工程技术人员作学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

电波与天线/左智成,李兴华编著. —合肥:合肥工业大学出版社,2006.8

ISBN 7-81093-484-8

I. 电… II. ①左…②李… III. ①电波传播—基本知识②天线—基本知识 IV. ①TN011②TN82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 094956 号

电 波 与 天 线

左智成 李兴华 等编著

责任编辑 朱移山

出 版 合肥工业大学出版社
地 址 合肥市屯溪路 193 号
邮 编 230009
电 话 总编室:0551-2903038
发行部:0551-2903198
网 址 www.hfutpress.com.cn
E-mail press@hfutpress.com.cn

版 次 2006 年 12 月第 1 版
2006 年 12 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 17.75
字 数 565 千字
发 行 全国新华书店
印 刷 合肥现代印务有限公司

ISBN 7-81093-484-8/TN·7

定价:29.80 元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社发行部联系调换

前 言

《电波与天线》是无线电通讯领域中一门很重要的专业课。本书作为无线电通信及广播电视技术专业的教材,是根据原广播电影电视部教育司颁发的教学大纲,参考国内外有关教材和资料,在作者多年教学实践的基础上经加工、充实、修改完成的。本书可供无线电通信、电子信息工程、卫星通信、移动通信、广播电视发送技术专业中专生及高职高专学生学习,也可作为相关工程人员的培训教材,对从事天馈线工作的技术人员也是一本实用的参考书。

全书共七章,涉及电波传播与天线两部分内容。其中第一章、第二章由李兴华同志编写,第三章由孙茂军同志编写,第四章、第七章由职新卫同志编写,芦秋菊同志完成了全书插图的绘制工作,左智成同志完成第五章、第六章的编写并对全书统稿定稿。郑州广播电视学校原校长、高级工程师刘长年审阅了本书初稿,提出了许多宝贵意见,在此表示谢意! 中原工学院广播影视学院领导和信息工程系对本书出版给予了极大的帮助,在此也深表谢意!

鉴于编者水平有限,书中难免存在一些缺点和错误,望读者批评指正。

编 者

2006 年 12 月

目 录

绪 论	(1)
第一章 矢量分析	(4)
§ 1-1 常用坐标系	(4)
一、齐卡尔一直角坐标系	(4)
二、柱坐标系	(5)
三、球坐标系	(6)
四、三种坐标系中坐标变量关系	(7)
§ 1-2 场论知识简介	(8)
一、场概念	(8)
二、矢量及表示法	(8)
三、标量场和标量场的梯度	(12)
四、矢量场的散度和旋度	(12)
五、散度、旋度和矢量场的关系	(15)
思考与练习题	(16)
第二章 电磁波的基本理论	(18)
§ 2-1 电磁波的基本概念	(18)
一、电磁波及其特性	(18)
二、电磁波的产生过程	(18)
三、电磁波的一般函数表示式	(19)
四、电磁波的分类	(20)
§ 2-2 电磁场量和场量方程	(20)
一、电磁场中的基本物理量	(20)
二、媒质的特性参数	(21)
三、电磁场的变化规律	(21)
§ 2-3 均匀理想介质中的平面电磁波	(27)
一、均匀理想介质中的场方程	(27)
二、均匀理想介质中平面电磁波的波函数	(28)

三、均匀理想介质中平面电磁波的特点·····	(30)
§ 2-4 导电媒质中的平面电磁波·····	(31)
一、导电媒质中的场方程·····	(31)
二、导电媒质中平面电磁波的形式·····	(32)
三、导电媒质中平面电磁波的特点·····	(33)
§ 2-5 导体中的平面电磁波·····	(34)
一、导体与导电媒质的关系·····	(34)
二、导体对电磁波的影响·····	(35)
三、导体中平面电磁波的特点·····	(37)
§ 2-6 电磁波的极化·····	(38)
一、电磁波极化的概念·····	(38)
二、研究电磁波极化的意义·····	(38)
三、电磁波的极化方式和特点·····	(38)
§ 2-7 电磁波的相速与群速·····	(42)
一、波群·····	(42)
二、群速·····	(43)
三、群速的计算·····	(43)
§ 2-8 电磁波的反射和折射·····	(43)
一、反、折射定律·····	(44)
二、反、折射系数·····	(45)
三、平面电磁波在导体界面上的反射·····	(49)
§ 2-9 电磁波的绕射、散射和干涉·····	(58)
一、绕射(衍射)·····	(58)
二、散射·····	(60)
三、干涉·····	(60)
思考与练习题·····	(61)
第三章 无线电波的传播·····	(63)
§ 3-1 无线电波的分类·····	(63)
一、波段划分·····	(63)
二、无线电波的传播途径·····	(63)
§ 3-2 惠更斯—菲涅尔原理·····	(64)
一、惠更斯—菲涅尔原理·····	(64)
二、菲涅尔区·····	(64)

§ 3-3 接收点场强的计算	(67)
一、空间无方向性天线的辐射场	(67)
二、空间有方向性天线的辐射场	(68)
三、地面上有方向性天线的辐射场	(68)
§ 3-4 电磁波在有线介质中的传输	(68)
一、传输线概念	(69)
二、传输线方程及其解	(71)
三、传输线的阻抗和反射系数	(73)
四、无耗传输线上的三种工作状态	(75)
§ 3-5 地面波传播	(80)
一、地面波概念	(80)
二、地面波传输的技术问题	(81)
三、地面波传输中接收点场强的计算	(83)
四、地面波通信特点	(86)
§ 3-6 电离层反射传输	(86)
一、天波概念	(86)
二、电离层及等效电参数	(86)
三、电离层传输电磁波的技术问题分析	(89)
四、天波通信中接收点场强的计算	(91)
五、短波通信特点	(91)
附:短波通信中接收点场强的计算方法和步骤	(92)
§ 3-7 空间波传播	(98)
一、空间波概念和传播方式	(98)
二、接收点场强的计算	(100)
三、空间波传播中的技术问题分析	(104)
四、空间波通信特点	(107)
思考与练习题	(107)

第四章 线天线基本理论

(110)

§ 4-1 天线及辐射	(110)
一、天线概念辐射过程	(110)
二、产生电磁辐射的条件	(110)
三、天线的分类和分析方法	(111)
§ 4-2 天线的特性参数	(112)

一、辐射功率和辐射电阻	(112)
二、天线效率	(113)
三、天线的输入阻抗	(113)
四、方向性参数	(114)
五、通频带	(116)
六、天线的极化	(116)
§ 4-3 接收天线的电参数	(116)
一、有效接收面积	(116)
二、等效噪声温度	(119)
三、无线电系统的噪声温度	(121)
四、天线的品质因素	(122)
§ 4-4 电磁基本振子的辐射场	(123)
一、电基本振子概念	(123)
二、电基本振子的辐射场	(123)
三、电基本振子辐射场的方向性	(124)
四、电基本振子的辐射功率和辐射电阻	(125)
五、磁基本振子的辐射	(126)
§ 4-5 电对称振子的辐射场	(129)
一、电对称振子及电流分布	(129)
二、电对称振子的辐射场	(130)
三、电对称振子辐射场的方向性	(132)
四、辐射功率和辐射电阻	(134)
五、输入阻抗	(134)
§ 4-6 天线阵理论	(137)
一、天线阵的作用及工作原理	(137)
二、一般直线阵的分析方法	(138)
三、均匀直线阵的分析方法	(139)
四、常见均匀直线阵	(140)
§ 4-7 地面对天线的影响	(144)
一、镜像法与镜像天线电流	(144)
二、地面对天线辐射场的影响	(146)
三、实际地面对天线方向性的影响	(149)
思考与练习题	(150)

第五章 常用线天线	(152)
§ 5-1 中波广播天线	(152)
一、中波广播天线的结构形式和电流分布	(152)
二、垂直接地天线的辐射场特性	(153)
三、中波天线的技术问题分析	(156)
§ 5-2 基本短波通信天线	(161)
一、基本短波通信天线的结构形式与电流分布	(161)
二、基本短波开线的辐射场	(162)
三、基本水平双极天线的技术问题分析	(164)
§ 5-3 实用短波天线	(166)
一、笼形天线	(166)
二、分支笼形天线	(168)
三、短波振子天线阵	(170)
四、角形天线	(173)
§ 5-4 菱形天线	(174)
一、菱形天线的结构形式	(174)
二、行波单导线天线的辐射场特性	(174)
三、菱形天线的辐射场	(178)
四、菱形馈电方式及参数	(179)
§ 5-5 引向天线	(180)
一、引向天线的结构特点	(180)
二、引向天线的工作原理	(180)
三、引向天线的尺寸选择	(183)
§ 5-6 改进型引向天线	(185)
一、X 形振子构成的引向天线	(185)
二、半波折合振子构成的引向天线	(186)
§ 5-7 超短波天线的馈电技术	(187)
一、问题的提出	(187)
二、同轴线造成不平衡馈电的原因	(188)
三、解决平衡与不平衡馈电的技术问题	(188)
§ 5-8 蝙蝠翼天线	(192)
一、蝙蝠翼天线的结构原理	(192)
二、蝙蝠翼天线的特性	(193)

三、蝙蝠翼天线的技术要求	(195)
§ 5-9 偶极板天线	(199)
一、偶极板天线的结构特点	(199)
二、偶极板天线的辐射场	(200)
三、偶极板天线的技术问题分析	(206)
§ 5-10 移动通信天线	(208)
一、移动通信天线的类型和结构特点	(208)
二、移动通信天线的安装规范	(214)
三、移动通信天线的技术问题分析	(215)
§ 5-11 天线的安装与调试	(219)
一、电视接收天线的安装与调试	(219)
二、卫星接收天线的安装与调试	(220)
三、通信系统的防雷技术	(223)
思考与练习题	(225)
第六章 面天线理论和常用面天线	(226)
§ 6-1 面天线研究的基本问题	(226)
一、适用波段和构成	(226)
二、面状天线的研究问题	(226)
三、分析方法	(226)
四、分析问题的步骤	(227)
§ 6-2 惠更斯—菲涅尔原理	(227)
§ 6-3 平面口面元上的等效电磁流及辐射场	(227)
一、口面场的形成	(228)
二、平面口面元上的等效电磁流	(228)
三、口面元辐射场表示式	(230)
四、平面口面辐射场的表示式	(231)
§ 6-4 平面口面辐射场特性的一般讨论	(233)
一、口面场均匀分布	(233)
二、口面场振幅沿坐标轴作余弦分布	(235)
三、口面场相移对辐射场的影响	(237)
§ 6-5 喇叭天线	(240)
一、喇叭天线的结构及分类	(240)
二、矩形喇叭天线口面场分布规律	(241)

三、喇叭天线辐射场方向性与最佳喇叭	(244)
§ 6-6 抛物面天线	(247)
一、抛物面天线的结构特点和工作原理	(247)
二、抛物面天线口面场分布和方向性	(249)
三、抛物面天线的技术特点	(250)
四、抛物面天线的参数选择	(255)
§ 6-7 卡塞格伦天线	(255)
一、卡塞格伦天线的工作原理	(255)
二、卡塞格伦天线的主要优缺点	(258)
思考与练习题	(259)
第七章 天线测量	(260)
§ 7-1 天线测试场地的选择	(260)
一、天线辐射场的菲涅尔区和夫朗和费区	(260)
二、最小测试距离	(260)
三、测试场环境影响的因素	(263)
§ 7-2 方向图的测量	(264)
一、固定天线法	(264)
二、旋转天线法	(265)
§ 7-3 增益的测量	(266)
一、固定天线法	(266)
二、比较法	(266)
§ 7-4 输入阻抗与驻波比测量	(268)
一、扫频长线驻波法	(268)
二、反射计法	(271)
三、测量线法	(271)
思考与练习题	(272)
参考文献	(273)

绪 论

一、电波与天线在无线电通信系统中的地位和作用

人类社会已进入 21 世纪,21 世纪是一个信息社会,那么什么是信息呢?

信息:人们未知的事件和未知事件发生的过程。

就信息来讲,需要经过采集→处理→传输几个环节,才能最终传到千家万户。而信息传输又需借助于媒体,目前主要的传输媒体有:广播电视、报纸、杂志、计算机网络等。可见广播电视在传输媒体中占有相当重要的地位。

《电波与天线》这门课程,可归类于无线电领域。而对于无线电概念,大家早已熟悉,那么到底无线电的含义是什么,或者说无线电到底包括哪些内容呢?

无线电:就是不用导线传输电能或电信号的一种通信方式。

像我们已从事过或将要从事的广播电视、通信、雷达探测等,都属于无线电通信的范畴。那么无线通信中的“无线”表现在哪里呢?这可以用我们熟悉的广播电视通信系统来说明。就这个系统来讲,基本组成如图 1 所示:

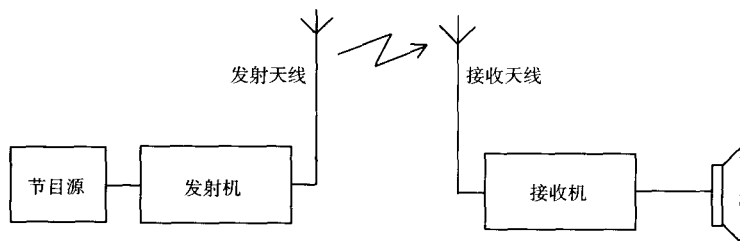


图 1 无线通信系统示意图

对于这样一个系统,当发射机和接收机都正常工作时,就可以由接收机直观地反映出发射机发出的信号和信息。

对于发射机、接收机,我们都看到过它们的结构,也了解其工作原理,它无非是由一些放大器、调制解调器等元器件利用导线相互联结而成的一个有机整体,从构成和原理讲,这样一个设备充其量叫电子系统或电子线路系统。那么为什么把这样的系统也叫无线电系统呢,无线表现在什么地方?一个显而易见的事实是发射天线和接收天线这段空间区域,确实没有导线或用导线传递信号,谁也未听过为收听广播或收看电视,在发射天线和接收天线之间拉一条导线来工作(有线电视系统除外),因此说真正的无线电通信就体现在这一区域。在这一区域信号是怎样传递的呢,它是把音频信号通过发射机这种电子系统进行音频放大、调制变频处理,最后变成高频已调波信号,通过馈线送到发射天线。发射天线以其独特的工作方式再将这个高频已调电流转换成同频率的电磁波,以固有方式和固有规律传到接收天线。到达接收天线的高频已调波在接收天线的作用下,再把电磁波转换成高频电流送到接收机,通过接收机的变

频、解调、放大等处理送到喇叭,或通过显像管变成图像或声音媒体被人所感知,这就是整个系统的工作过程。

由此过程可见,真正实现广播电视以“无线”电传输过程的是发射天线和接收天线之间的空间区域,也正因为在这—系统中有这样一种独特的,也是奇妙的信号传输过程,因而才把整个这种通信方式或类似存在这种方式的通信过程称为无线电通信,这一空间区域也称为**无线信道**。

在无线电通信过程中,携带信息的电磁波对无线通信起到了决定性作用,而形成电磁波的源是由天线、馈线构成的。因此说天线可以看作是无线电通信中的一种场源。由它发射出的电磁波是运送信息到千家万户的工具,也叫**载体**。一副好的天线对无线电通信产生的效益是很大的,天线周围的自然环境对电波的远距离传输也有很大影响。因此,对天线辐射电磁波的规律和天线特征的认识和了解,对电磁波的传输规律和特征的认识和了解就显得尤为突出和重要。一个明显的例子就是发射机质量很高、很先进,如果没有一副好的天线与发射机配套,同样无法把电波发射出去,更谈不上把电磁波送到千家万户。假如用中波天线发射短波或超短波信号,同样达不到传送信号的目的和质量,达不到人们的听觉和视觉的要求。

二、研究对象

由上面的分析就可以明显看到,该门课程的研究对象或重点就是天馈线和电磁波。也可以概括地说是研究天线的辐射规律和电磁波的传播规律,具体来讲:

天线:研究其辐射电磁波的规律,包括辐射过程,辐射强度,辐射场的方向性,辐射场强度与频率、天线形状及周围媒质的关系。

电波:研究其传播规律,包括自身的传播规律、传播特性及与周围环境的关系、与频率的关系。

三、研究方法

要讨论其研究方法有必要搞清其性质。电波与天线研究的是“场”问题,即空间发生的物理现象,对其研究的方法应结合场的特点来制定。场的特点:

(1)电磁波或电信号以波动的形式存在,或者说电磁波以波动形式弥散于整个空间。既看不见,也摸不着,只能借助仪器观察,通过大脑去想象其分布。

(2)电磁波与电磁辐射均属于“场”的范畴,与电路有本质的区别,主要表现在:

- ①使用的物理量不同;
- ②遵从的物理规律不同;
- ③存在的空间不同;
- ④使用的频率不同。

根据场的特点,可制定出研究电磁辐射和电磁波传播的分析方法如下:

1. 理论分析法

理论分析法研究电波与天线问题的出发点是麦克斯韦方程组和边界条件,此二条是分析电磁场问题的理论基础,它在电磁场问题中的作用相当于电路中的 KVL 和 KCL。这种方法的优点是分析问题比较严谨和准确,缺点是遇到的数学问题比较复杂,而且难于解决。

2. 工程分析法

工程分析法就是根据理论工作者得出的一些结论和经验公式,依此为基础分析电波与天

线的传输与辐射问题,达到研究天线和电波传输特性的目的。此种方法的优点是便于掌握和应用,缺点是得到的结果与实际情况有一点出入,而且在个别情况下,得出的结论用近似分析方法无法解释清楚。遇到这种情况,还必须回到理论分析方法中进行解决。

正因为该门课程存在两种分析方法,一种是理论分析法,一种是近似分析法或工程分析法。因此,学习这门课程就要求具有很强的灵活性,学习难度也相对较大,需慢慢摸索和掌握适合自己的学习方法。

第一章 矢量分析

电波与天线问题的研究对象,主要是对电磁波的辐射特点和传播规律进行分析研究。而电磁波的性质是通过电磁场量来反映的,电磁场量又表现为时间和空间的矢量函数。因此对电磁场变化规律的研究就归结在一定的坐标系下,对标量、矢量函数的分析与研究。鉴于此,有必要在分析电波与天线问题之前,先对矢量和各种坐标系的构成做一复习。

§ 1-1 常用坐标系

一、齐卡尔 — 直角坐标系

坐标系实际上是对三维空间的抽象描述,或者说理论研究中,为了容易说明物理量在空间的位置大小和指向,就采用坐标系,其中用直角坐标系反映空间最为直观。

1. 构成

直角坐标系的构成如图 1-1-1 所示。

直角坐标系可以看成是由相互垂直的三条射线构成。这三条射线实际上是空间中的三个相互垂直的三个平面的相交线。为了区分方便,分别称为 x 、 y 、 z 轴,各自的正方向用 $\vec{i}$ 、 $\vec{j}$ 、 $\vec{k}$ 或 $\vec{e}_x$ 、 $\vec{e}_y$ 、 $\vec{e}_z$ 表示。为使分析问题方便,同时也使分析同一问题能得到相同的结果,规定三个正方向之间满足右手螺旋关系,即

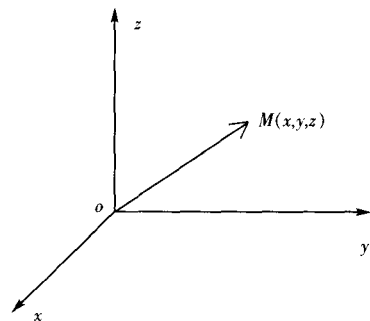


图 1-1-1 直角坐标系构成

$$\begin{cases} \vec{e}_x \times \vec{e}_y = \vec{e}_z \\ \vec{e}_y \times \vec{e}_z = \vec{e}_x \\ \vec{e}_z \times \vec{e}_x = \vec{e}_y \end{cases} \quad (1-1-1)$$

要用直角坐标系涵盖整个三维空间,三个坐标变量的取值范围是

$$-\infty < x < +\infty; -\infty < y < +\infty; -\infty < z < +\infty.$$

2. 特点

直角坐标系的三个坐标轴正方向不随空间点的位置而变化。

3. 坐标面方程

直角坐标系中的三个坐标面均为平面,用方程形式表示为

$$\begin{aligned}
 & xoy \text{ 面, 方程是 } z = 0; \\
 & yoz \text{ 面, 方程是 } x = 0; \\
 & zox \text{ 面, 方程是 } y = 0.
 \end{aligned}
 \tag{1-1-2}$$

与这三个坐标面平行的平面方程为

$$\begin{aligned}
 & \text{平行于 } xoy \text{ 面, 方程是 } z = z_1; \\
 & \text{平行于 } yoz \text{ 面, 方程是 } x = x_1; \\
 & \text{平行于 } zox \text{ 面, 方程是 } y = y_1.
 \end{aligned}
 \tag{1-1-3}$$

4. 点的表示

直角坐标系中, 点可用坐标表示成 $M(x, y, z)$, 如图 1-1-1 所示。

直角坐标系中的点也可用从坐标原点 O 指向点 M 的有向线段表示为 $\overrightarrow{OM}$, 它与坐标的关系为:

$$\overrightarrow{OM} = x_1 \vec{e}_x + y_1 \vec{e}_y + z_1 \vec{e}_z \tag{1-1-6}$$

把从坐标原点 O 指向点 M 的有向线段 $\overrightarrow{OM}$, 称为点 M 的位置矢量, 位置矢量和点是一一对应关系。

5. 面元、体元表示

面元可分别表示为:

$$\begin{cases}
 xoy \text{ 面, 面元为 } ds_z = dxdy; \\
 yoz \text{ 面, 面元为 } ds_x = dydz; \\
 zox \text{ 面, 面元为 } ds_y = dzdx.
 \end{cases}
 \tag{1-1-7}$$

体元可表示为

$$dv = dxdydz$$

二、柱坐标系

1. 构成

柱坐标系的构成如图 1-1-2 所示。

其三个坐标轴和对应的坐标变量分别为 ρ, φ, z , 各坐标轴的正方向用 $\vec{e}_\rho, \vec{e}_\varphi, \vec{e}_z$ 表示。为使分析问题方便, 同时也使分析同一问题能得到相同的结果, 规定三个正方向之间满足右手螺旋关系, 即

$$\begin{cases}
 \vec{e}_\rho \times \vec{e}_\varphi = \vec{e}_z \\
 \vec{e}_\varphi \times \vec{e}_z = \vec{e}_\rho \\
 \vec{e}_z \times \vec{e}_\rho = \vec{e}_\varphi
 \end{cases}
 \tag{1-1-8}$$

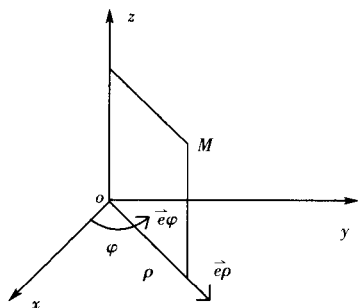


图 1-1-2 直角坐标系构成

要用柱坐标系涵盖整个三维空间时, 三个坐标变量