

天线

李绪益编

华南工学院



天线

李绪益编

华南工学院出版社

7N820
1

天 线

李绪益 编

5
3
1

华南工学院出版社

内 容 简 介

本书在介绍天线基本理论的基础上,介绍了各个波段常用的典型的天线。例如,长中波的顶部加载天线、抗衰落天线;短波段的水平半波天线、同相天线阵、菱形天线;超短波段的引向天线(八木天线)、十字形天线、蝙蝠翼天线及螺旋天线;微波段的喇叭天线、抛物面天线及卡塞格伦天线等。其中,对电视接收和电视差转中广泛应用的引向天线,对卫星电视接收中普遍采用的抛物面天线和卡塞格伦天线均作了较详细的讨论。有关电波传播的问题也适当作了介绍。

本书重点突出,内容由浅入深,理论联系实际,避免高深繁冗的数学运算。书中有大量图表,书末有一定数量的习题,并部分给出答案。本书既可以作高等学校的教学用书,也可以供从事无线电技术、通讯、广播、电视差转等的工作者参考。

天 线

李绪益 编

华南工学院出版社出版

(广州·五山)

广东省新华书店发行

广东省番禺印刷厂印刷

开本787×1092 1/32 印张 7.56 字数 169千字

1986年11月第1版 1986年11月第1次印刷

印数: 1—10000

统一书号: 15410·025 定价: 1.80元

前 言

本书是根据历年来讲授“天线原理”课程的讲稿加以修订补充而成的。内容包括三大部分：第一部分是线天线的基本理论，包括天线的方向性、阻抗以及接收天线理论；第二部分是线天线设备，包括长中波天线、短波天线、超短波天线；第三部分为口面辐射理论与面式天线。最后一章介绍天线测量方面的有关知识，供需要的读者参考。

在编写过程中，力求精选内容，突出重点，理论联系实际；既阐明工作原理、计算公式，又兼顾工程设计方面的有关知识；在叙述上，由浅入深，循序渐进，避免繁冗的数学运算，便于自学。每章末尾附有思考题，书末附有一定数量的习题，部分给出答案，以方便读者的复习和自检。

本书除可作为无线电技术、~~通讯、广播~~等专业的教材外，亦可作为从事上述工作的工程技术人员、生产人员以及天线爱好者的参考书。

由于编者水平有限，错误与不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

緒论	(1)
第一章 元振子的辐射及天线的特性参数	(4)
1.1 元振子的辐射	(4)
1.2 对称振子的辐射场	(10)
1.3 对称振子的方向图	(13)
1.4 对称振子的辐射功率及辐射电阻	(15)
1.5 对称振子的输入阻抗	(18)
1.6 对称振子的方向性系数及增益	(25)
1.6.1 天线的方向性系数	(25)
1.6.2 天线的增益	(26)
1.7 天线的极化特性	(27)
1.8 电流环(磁偶极子)的辐射场	(29)
思考题	(32)
第二章 天线阵	(33)
2.1 二元天线阵	(33)
2.2 均匀直线式天线阵	(36)
2.2.1 同相天线阵	(38)
2.2.2 端射式天线阵	(39)
2.3 方向图相乘原理	(40)
2.4 反射面的影响	(42)

2.4.1	地面对天线方向图的影响.....	(42)
2.4.2	地面对天线阻抗的影响.....	(47)
2.4.3	感应电动势法求天线的自阻抗和互阻抗.....	(48)
	思考题.....	(57)
第三章	接收天线	(58)
3.1	天线接收无线电波的物理过程.....	(58)
3.2	接收天线与发射天线的互易性.....	(59)
3.3	接收天线的电参数.....	(62)
3.3.1	接收天线的最大输出功率.....	(63)
3.3.2	接收天线的有效面积.....	(63)
3.3.3	接收天线的噪声温度.....	(64)
	思考题.....	(67)
第四章	线天线及其馈电	(68)
4.1	电波传播的方式.....	(68)
4.1.1	地球及其外围空间的概况.....	(68)
4.1.2	地面波传播.....	(70)
4.1.3	天波传播.....	(70)
4.1.4	视距传播.....	(71)
4.2	长中波传播的特点及单极天线.....	(72)
4.2.1	长中波的传播特点.....	(72)
4.2.2	单极天线.....	(73)
4.3	短波传播的特点、双极天线及行波菱形天线	(76)
4.3.1	短波传播的特点及对天线的要求.....	(76)
4.3.2	双极天线——水平对称振子.....	(78)
4.3.3	笼形天线.....	(80)
4.3.4	同相水平天线阵.....	(81)

4.3.5	菱形天线	(83)
4.4	视距传播与引向天线	(87)
4.4.1	视线距离及对天线的要求	(87)
4.4.2	引向天线(八木天线)	(89)
4.5	线天线的馈电	(102)
4.5.1	对馈电系统的要求	(102)
4.5.2	馈线的种类	(104)
4.5.3	长中波天线的馈电	(107)
4.5.4	短波天线的馈电	(112)
4.5.5	超短波天线的馈电	(113)
4.6	螺旋天线	(121)
4.6.1	法向模螺旋天线	(122)
4.6.2	轴向模螺旋天线	(123)
4.6.3	边射螺旋天线	(123)
4.7	电视差转发射天线	(124)
4.7.1	对电视发射天线的要求	(124)
4.7.2	十字形旋转场天线	(125)
4.7.3	蝙蝠翼天线	(128)
思考题		(130)
第五章 面状天线		(131)
5.1	面状天线理论的基本问题	(131)
5.1.1	概述	(131)
5.1.2	惠更斯——夫累涅尔原理	(132)
5.2	面元的辐射特性	(134)
5.2.1	等效原理	(134)
5.2.2	面元的辐射特性	(135)
5.3	不同口面场分布的辐射场	(140)

5.3.1	均匀分布的矩形口面	(142)
5.3.2	余弦分布的矩形口面	(146)
5.3.3	均匀分布的圆形口面	(148)
5.3.4	渐变分布的圆形口面	(151)
5.3.5	口面上场的相位产生偏移时对方向图的影响...	(155)
5.4	喇叭天线	(157)
5.4.1	喇叭天线的形式	(157)
5.4.2	喇叭天线的方向性	(159)
5.5	抛物面天线	(165)
5.5.1	抛物面天线的基本概念	(165)
5.5.2	抛物面天线的辐射特性	(171)
5.5.3	抛物面天线的馈源	(181)
5.5.4	反射面与馈源的相互影响及其克服办法	(185)
5.5.5	公差	(186)
5.6	卡塞格伦天线	(187)
5.6.1	卡塞格伦天线的构造及工作过程	(187)
5.6.2	卡塞格伦天线的几何关系	(188)
5.6.3	卡塞格伦天线的分析方法	(190)
5.7	高效率馈源	(193)
5.7.1	阶梯喇叭	(195)
5.7.2	环形槽馈源	(196)
5.7.3	变张角喇叭	(197)
5.7.4	波纹喇叭	(197)
	思考题	(201)
第六章	天线测量	(202)
6.1	对天线测试场地的要求	(203)
6.1.1	天线场区的划分	(203)

6.1.2	最小距离.....	(203)
6.1.3	测试场地.....	(206)
6.2	方向图的测量	(208)
6.2.1	固定天线法	(208)
6.2.2	旋转天线法	(209)
6.3	天线增益的测量	(211)
6.3.1	比较法.....	(211)
6.3.2	双天线法	(213)
6.4	天线输入阻抗的测量	(213)
6.4.1	电桥法	(214)
6.4.2	测量线法	(214)
6.4.3	反射计法	(214)
6.4.4	矢量电压法	(215)
6.4.5	扫频法.....	(216)
习 题		(218)
参考书		(230)
附录	国产常用电缆的技术规格.....	(232)

绪 论

通信、广播、电视、雷达、导航等无线电技术设备中，都需要有无线电波的辐射和接收，用以完成这个作用的装置称之为天线，图0-1表示一个无线电通信系统。其中，发射天线是将高频电流能量转变为预定空间的电磁波能量。接收天线是将预定空间来的电磁波能量转变为高频电流能量。

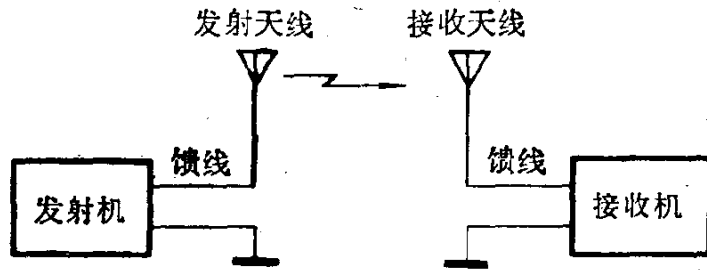
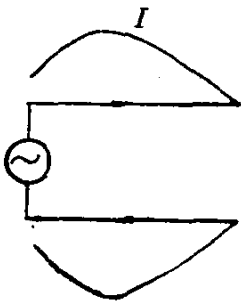
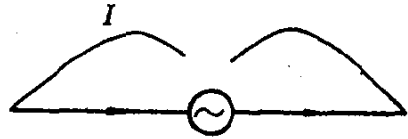


图0-1 无线电通信系统示意图

天线要能有效地辐射或接收电磁波，其结构和形式就必须满足一定的要求。对于象图0-2(a)所示的双线传输



(a) 开路线



(b) 对称振子

图0-2 天线的结构

线这样的封闭式结构，由于它在周围空间激发的电磁波很微弱而不能作为天线。然而象图 0-2 (b)所示的张开的双线开路线，由于张开部分的两臂上的电流方向相同，它们在周围空间所激发的电磁场，在某些方向上同相相加而使辐射显著增强，因而有效地成为天线。由末端开路的平行双导线张开而成的天线，就是通常的对称振子天线。

对天线的基本要求除了应有强的辐射能力外，根据无线电技术设备的任务不同，常常还要求天线具有方向性。对发射天线而言，这意味着辐射能量应集中于所要求的方向上。例如雷达搜索或跟踪目标时就是如此。否则，部分功率就要浪费在不需要的空间上。对接收天线而言，这意味着它能灵敏地接收所需要的信号，而不接收其它方向来的干扰和噪声信号，以提高接收机输入端的信噪比。

天线的型式很多，有各种不同的分类法。按用途的不同可将它们分为通信天线、广播天线、雷达天线、导航天线、测向天线等。按工作频段的不同可分为长波天线、中波天线、短波天线、超短波天线和微波天线等。按频带特性可分为窄带天线、宽频带天线和超宽频带天线。按方向性可分为全向天线、弱方向性天线、锐方向性天线等。按极化特性可分为线极化天线，圆极化天线和椭圆极化天线等。从便于分析和研究天线的性能出发，一般分为两大类：一类是由半径远小于波长的金属导线或金属棒所构成的线状天线，称为线天线；另一类是由物理尺寸大于波长的金属或介质面构成的面状天线，称为面天线。线天线主要用于长波、中波及短波段，面天线主要用于微波波段。超短波段则两者兼用。

天线作为无线电技术设备的出口与入口，有着重要的作用。提高天线的性能，无论在经济上或技术上都具有重要的

意义。

研究天线问题，实质上是研究天线所产生的空间电磁场分布，以及由空间电磁场分布所决定的天线特性。严格求解天线问题就是求麦克斯韦方程在特定条件下的解。一般情况下，这是个极为复杂的数学问题。在实际问题中，往往将条件理想化进行一些近似处理，从而得到近似的结果。

第一章 元振子的辐射及天线的特性参数

1.1 元振子的辐射

实际使用中的线天线，均可认为是由若干元振子所构成，因此必须首先了解元振子的辐射特性。所谓元振子就是长度 $dl \ll \lambda$ ，其上载有高频电流 i_A 的一段电流元，如图 1-1(a) 所示。

振子两端接入金属球或金属板的目的是使 dl 上的电流趋于均匀。如不计金属球的辐射，则图 1-1(a) 可用图 1-1(b) 来等效。导线上的传导电流流至末端时，转变为两端之间的电容中存在的位移电流。下面先定性地说明电磁波是怎样辐射出去的，然后再作定量的分析。

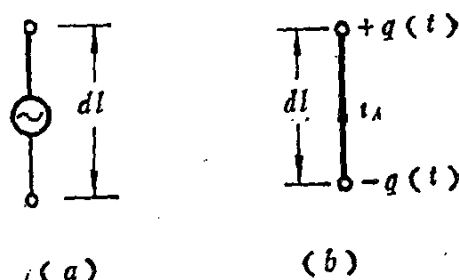


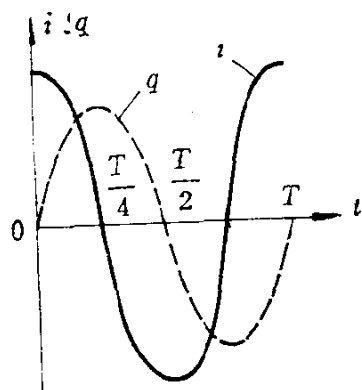
图1-1 元振子

若元振子上的电流作正弦变化〔见图 1-2〕，即 $i_A = I_A \cdot \cos \omega t$ ，两端累积的电荷为 q ，那么有

$$q(t) = \int i_A dt = \frac{I_A}{\omega} \sin \omega t = q_A \sin \omega t$$

可见振子上的电流和电荷在时间相位上相差 90° 。

当电流变化时，在元振子附近就有电场和磁场产生。我们先将元振子附近的电场看为由元振子两端累积的电荷所产生。在不同的时刻，电荷经历了增加、最大、减少、消失等变化。因此，由其产生的电场也随之作相应的变化，即电力线由疏到密，到消失，以后再产生。但是必须注意到，只有在元振子附近，才可认为电场决定于 q 的



$$i = I_m \cos \omega t \quad q = q_m \sin \omega t$$

图1-2 天线上电流与电荷的相位关系

瞬时值，与 q 同相地变化。在离开元振子 $\frac{\lambda}{4}$ 处，其推迟的时间为 $\Delta t = \frac{\lambda/4}{v} = \frac{T}{4}$ 。可见该处的电场变化较 q 的变化滞后 90°

的相角。当 q 自最大值变零的一段时间内该处的电场反而由零增大。记住了元振子附近的电场（即电力线）与电荷相联系，而磁场与电流相联系，并随着距离的增加有滞后现象，便可画出下面不同时刻振子周围的电磁力线分布图（图中 H 线未画出）。

当 $t=0$ 时，空间仅存在由振子上的电流产生的磁力线，它是围绕振子轴的闭合线，方向用右手定则决定。

当 $t = \frac{T}{8}$ 时，在振子周围同时存在电力线和磁力线，电力线从正电荷发出而终止于负电荷上。

当 $t = \frac{T}{4}$ 时，铜球上的电荷充电到最大，所以电力线在增长，并以一定速度沿径向扩张，而磁力线在逐渐消失，但由于它的变化滞后于电流一段时间，故此瞬间在离开振子较远

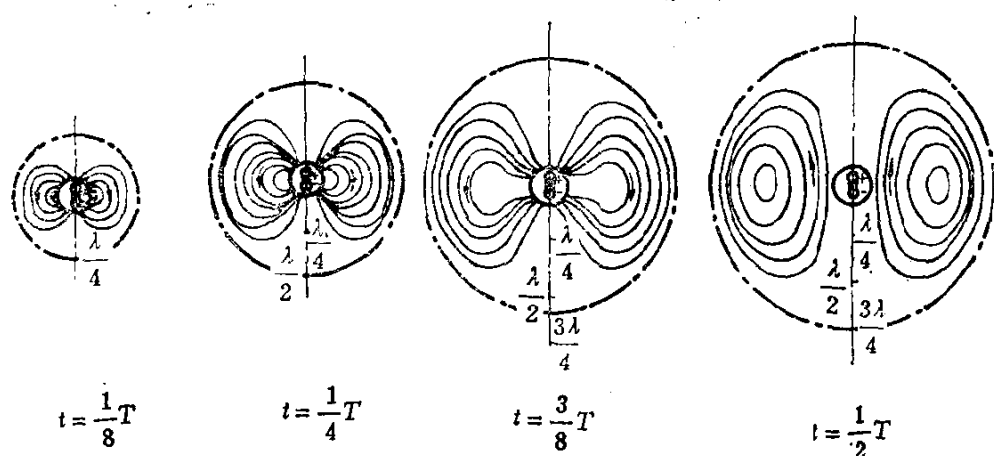


图1-3 元振子周围空间的电力线图

处的磁场不立刻随之消失，而形成了一部分不受控制的“自由磁场。”

当 $t = \frac{3}{8}T$ 时，电流反向而出现了反向磁力线，由于电力线的变化滞后于电荷的变化，结果此时靠近振子空间的电力线已开始收缩，而远处的电力线却仍在扩张，在这两个因素的作用下，使电力线呈弯曲形状。

当 $t = \frac{T}{2}$ 时，反向磁力线在逐渐增长，而电荷消失迫使电力线的一部分自身闭合形成“自由电场”，它与 $t = \frac{T}{4}$ 所形成的“自由磁场”在同一空间（方向彼此垂直）构成了同相的电磁场，并以光的速度和坡印亭矢量所决定的方向传播，这就是辐射电磁波。

电磁波的辐射是客观存在的现象，不是假想更不是臆造出来的，只要把电磁场作为物质的一种形态就不难理解这种现象了。

下面应用矢量位 $\vec{A}$ 来计算元振子在其周围空间产生的场量。设电流元位于球坐标的原点，轴线沿 z 轴，如图1-4所示。

由克希荷夫公式可得场点 $P(r, \theta, \varphi)$ 处的矢位 $\vec{A}(P)$ 为

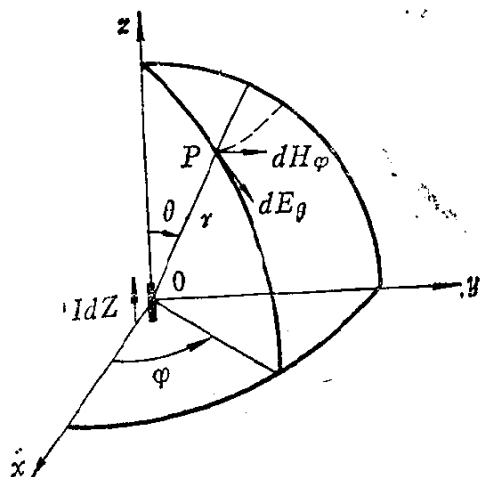


图1-4 元振子及其坐标系

$$\vec{A}(P) = \frac{\mu}{4\pi} \int_V \frac{\vec{J}_0(r')}{r} e^{-jkr} dV \quad (1.1)$$

这里电流元为线电流，故 $\vec{J}_0(r') dV = \vec{I}(Z) dZ = IdZ \hat{z}$ 。

式中 $\vec{J}_0$ 为电流密度矢量， dV 为体积元， $\hat{z}$ 为 z 方向的单位矢量， $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为波数。考虑到 $dl \ll r$ 和 I 为常数，则

$$\vec{A}(P) = \frac{\mu}{4\pi} \int \frac{I(Z) e^{-jkr}}{r} \hat{z} dZ = \frac{\mu Idl}{4\pi} \left(\frac{e^{-jkr}}{r} \right) \hat{z} \quad (1.2)$$

采用球坐标系，则

$$\begin{cases} A_r = A_z \cos \theta = \frac{\mu Idl}{4\pi} \left(\frac{e^{-jkr}}{r} \right) \cos \theta \\ A_\theta = -A_z \sin \theta = -\frac{\mu Idl}{4\pi} \left(\frac{e^{-jkr}}{r} \right) \sin \theta \\ A_\varphi = 0 \end{cases} \quad (1.3)$$

根据矢量位 $\vec{A}$ 可先求出 $\vec{H}$ 。由 $\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \vec{A}$ 即得

$$\begin{cases} H_r = 0 \\ H_\theta = 0 \\ H_\varphi = j \frac{Idl}{2\lambda} \sin\theta \left(1 + \frac{1}{jkr} \right) e^{-jkr} \end{cases} \quad (1.4)$$

再由 $\vec{E} = \frac{1}{j\omega\epsilon} \nabla \times \vec{H}$ 求得

$$\begin{cases} E_r = \frac{WIdl}{2\pi r^2} \cos\theta \left(1 + \frac{1}{jkr} \right) e^{-jkr} \\ E_\theta = j \frac{WIdl}{2\lambda r} \sin\theta \left[1 + \frac{1}{jkr} + \frac{1}{(jkr)^2} \right] e^{-jkr} \\ E_\varphi = 0 \end{cases} \quad (1.5)$$

式中 $W = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ 为媒质的波阻抗。在自由空间中 $W = Z_0 = 120\pi \approx 377$ 欧。

式(1.4)和式(1.5)揭示了电流元的电磁场结构。可以看出, 电流元的电场有 E_r 和 E_θ 两个分量, 磁场仅有 H_φ 分量, 而且电场矢量与磁场矢量互相垂直。如果用电力线和磁力线形象地描绘电磁场, 则电力线是在子午平面(包含 z 轴的平面)内的, 磁力线是在垂直于 z 轴的平面内并且与纬线重合。电磁场的各个分量均随 r 的增大而减小, 每个分量中的各项随 r 的增大而减小的速度不相同, 如果按 r 的大小进行分区, 则各区的电磁场可以有不同的近似表示式。

1. 近场(感应场)区

当 $kr \ll 1$ 时, 电磁场主要由 r^{-2} 或 r^{-3} 的高阶项决定, 又由于 $e^{-jkr} \approx 1$, 故式(1.4)和式(1.5)变为

$$\begin{cases} E_r \approx -j \frac{Idl}{4\pi r^3} \frac{2}{\omega\epsilon} \cos\theta \\ E_\theta \approx -j \frac{Idl}{4\pi r^3} \frac{1}{\omega\epsilon} \sin\theta \\ H_\varphi \approx \frac{Idl}{4\pi r^2} \sin\theta \end{cases} \quad (1.6)$$