

天线技术

马汉炎



哈尔滨工业大学出版社

32
28

内 容 简 介

本书系作者在哈尔滨工业大学多年讲授《天线与电波》讲义的基础上,经精选、修订并重新编写而成。

全书共9章。主要讲述天线的基本原理与基本分析方法、主要电参数和测试方法;介绍常用典型天线及无线电波传播的基本知识。各章末附有一定数量的习题。

本书可作为高等学校工科电子类各专业本科教材或教学参考书;也可供从事通信、广播、电视、遥测、雷达等部门工程技术人员参阅。

天线技术

Tianxian Jishu

马汉炎

*

哈尔滨工业大学出版社出版发行
哈尔滨工业大学印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 11.25 字数 254千字

1997年4月第1版 1997年4月第1次印刷

印数 1-1000

ISBN 7-5603-1218-7/TN·39 定价 18.00元

1.4 互易定理与接收天线电参数

1.4.1 互易定理

天线接收物理过程是, 天线导体在空间电场作用下激起感应电动势, 并在导体表面产生电流, 该电流流进天线负载, 使接收机输入回路中产生电流, 或在馈电系统中产生导波能量。所以, 接收天线是一个把空间电磁波能量转换成高频电流能量(或导波能量)的转换装置, 其工作过程恰是发射天线的逆过程。现以电基本振子为例来说明接收过程。

通常情况下接收天线位于发射天线远区辐射场中。作用在接收天线上的电磁波可认为是平面波。对于 $l \ll \lambda$ 的电基本振子, 情况更是如此。如图 1-9 所示。设来波方向与振子轴夹角为 θ 。电波的电场一般可分成两个分量。一个是和电波传播方向及天线轴线所构成的平面相垂直的分量 E_v , 另一个是在上述平面内的分量 E_θ 。只有同天线轴线平行的电场分量 $E_z = -E_\theta \sin \theta$ 才能在天线导体上激起感应电动势 E_i 。由于 $l \ll \lambda$, 该感应电动势以及由此建立起的天线电流是等幅同相的, 即 $E_i = E_\theta l \sin \theta$ 。由此可见, 接收天线的感应电动势 E_i 与来波方向 θ 有关。也就是说, 接收天线有方向性, 而且电基本振子的接收方向性函数与它的发射方向性函数一样, 同 $\sin \theta$ 成正比, 其有效接收电波的极化方向 E_θ 同它的发射极化方向也相同。

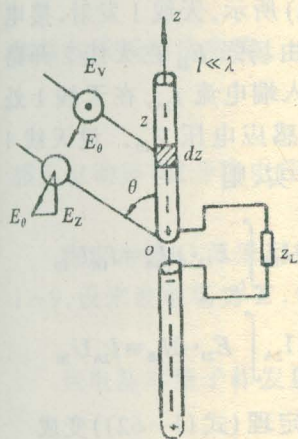


图 1-9 平面电磁波对电基本振子的作用

接收天线和发射天线一样, 也采用各种电参数表征接收天线的性能, 包括方向特性, 阻抗特性和极化特性。值得指出的是, 这些参数同它用作发射天线时是一致的, 这可用互易定理来证明。

假设整个真空区域 V 中有两组场源, 与电流密度 J_1 相联系的电场强度为 E_1 , 而与电流密度 J_2 相联系的电场强度为 E_2 。互易定理指出

$$\int_V J_1 \cdot E_2 dV = \int_V J_2 \cdot E_1 dV \quad (1-62)$$

让我们来证明。根据麦克斯韦方程 $J_1 = \nabla \times H - j\omega \epsilon_0 E_1$

$$\begin{aligned} J_1 \cdot E_2 &= E_2 \cdot \nabla \times H_1 - j\omega \epsilon_0 E_1 \cdot E_2 = -\nabla \cdot (E_2 \times H_1) + H_1 \cdot \nabla \times E_2 - j\omega \epsilon_0 E_1 \cdot E_2 \\ &= -\nabla \cdot (E_2 \times H_1) - j\omega \mu_0 H_1 \cdot H_2 - j\omega \epsilon_0 E_1 \cdot E_2 \end{aligned} \quad (1-63)$$

同法可得
则

$$J_2 \cdot E_1 = -\nabla \cdot (E_1 \times H_2) - j\omega \mu_0 H_2 \cdot H_1 - j\omega \epsilon_0 E_2 \cdot E_1 \quad (1-64)$$

$$\begin{aligned} \int_V (J_1 \cdot E_2 - J_2 \cdot E_1) dV &= \int_V [\nabla \cdot (E_1 \times H_2) - \nabla \cdot (E_2 \times H_1)] dV \\ &= \oint_S (E_1 \times H_2 - E_2 \times H_1) \cdot e_n ds \end{aligned} \quad (1-65)$$

式中 S 为半径趋于无限大的球面。假设电流分布在有限体积里, 此时闭合面 S 上任意点的电磁波都可以视为平面电磁波, 则有

$$E_1 = \eta_0 H_1 \times e_r, \quad E_2 = \eta_0 H_2 \times e_r,$$

代入式 (1-65), 右边项变为

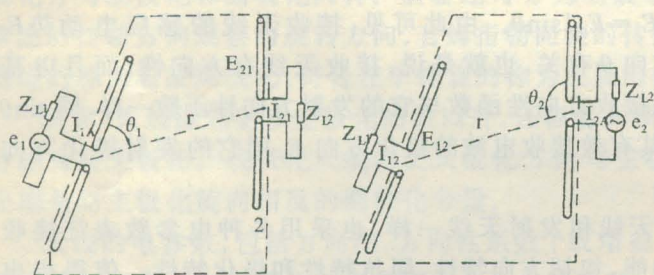
$$\eta_0 \oint_S [H_1 \times e_r] \times H_2 - (H_2 \times e_r) \times H_1 \cdot e_n ds$$

代入矢量三重积公式, 并注意到 $H_1 \cdot e_r = H_2 \cdot e_r = 0$, 得

$$\eta_0 \oint_S [(H_1 \cdot H_2) e_r - (H_1 \cdot e_r) H_2 - (H_2 \cdot H_1) e_r + (H_2 \cdot e_r) H_1] \cdot e_n ds = 0$$

所以, 互易定理 (式 (1-62)) 成立。下面应用此定理证明天线的互易性质并据此分析接收天线。

假设有两副任意形式的天线任意放置在真空中, 如图 1-10(a) 所示。天线 1 发射, 接电源 e_1 , 输入端电流 I_{1A} , 在天线 2 处产生的场强为 E_{21} , 天线 2 接收, 由场强 E_{21} 在天线 2 开路端引起感应电压 V_{20} ; 反过来, 见图 1-10(b)。天线 2 接电源 e_2 , 输入端电流 I_{2A} , 在天线 1 处产生的场强为 E_{12} , 天线 1 接收, 由场强 E_{12} 在天线 1 开路端引起感应电压 V_{10} 。设天线 1 和 2 中间间隙长度分别为 l_{10} 和 l_{20} , 并注意到导体中场强为零的事实, 则



(a) 天线 1 发射, 天线 2 接收

(b) 天线 2 发射, 天线 1 接收

图 1-10 用互易定理分析接收天线

$$\int_V J_1 \cdot E_2 = I_{1A} \int_{l_{10}} E_{12} \cdot dl_{10} = I_{1A} U_{10}$$

$$\int_V J_2 \cdot E_1 = I_{2A} \int_{l_{20}} E_{21} \cdot dl_{20} = I_{2A} U_{20}$$

此时, 互易定理 (式 (1-62)) 变成

$$\frac{U_{10}}{I_{2A}} = \frac{U_{20}}{I_{1A}} \quad (1-66)$$

此式为电路理论中互易定理的表示式。

若接收天线接负载, 参照图 1-10, 则有关系式 $U_{10} = I_{12}(Z_{L1} + Z_{A1})$, $U_{20} = I_{21}(Z_{L2} + Z_{A2})$, 代入式 (1-66) 得

$$\frac{I_{12}(Z_{L1} + Z_{A1})}{I_{2A}} = \frac{I_{21}(Z_{L2} + Z_{A2})}{I_{1A}} \quad (1-67)$$

式中 Z_{A1} 、 Z_{L1} 分别为天线 1 的输入阻抗和电源内阻抗 (或负载阻抗); Z_{A2} 、 Z_{L2} 分别为天线 2 的输入阻抗和电源内阻抗 (或负载阻抗)。

由天线场强的一般表示式 (1-44) 可知, 当天线 1 输入电流 I_{1A} , 它在天线 2 处辐射场为

$$E_{21} = j \frac{I_{1A} l_{e1} e^{-jkr}}{2\lambda r} Z_0 F_1(\theta, \varphi) e_{21} = E_{21} e_{21} \quad (1-68)$$

式中 l_{e1} 、 $F_1(\theta, \varphi)$ 分别为天线 1 的有效长度和归一化方向性函数, 均归算于输入电流。由式 (1-68) 可得

$$I_{1A} = \frac{2\lambda r E_{21}}{j Z_0 l_{e1} F_1(\theta, \varphi) e^{-jkr}} \quad (1-69)$$

同理可得

$$I_{2A} = \frac{2\lambda r E_{12}}{jZ_0 I_{e2} F_2(\theta, \varphi) e^{-jk r}} \quad (1-70)$$

将式(1-69)和式(1-70)代入式(1-67),经化简,得

$$\frac{Z_{L1} + Z_{A1}}{I_{e1} F_1(\theta, \varphi)} \frac{I_{12}}{E_{12}} = \frac{Z_{L2} + Z_{A2}}{I_{e2} F_2(\theta, \varphi)} \frac{I_{21}}{E_{21}} \quad (1-71)$$

由于比值 I_{12}/E_{12} (或 I_{21}/E_{21}) 是外加单位场强时在天线 1 (或天线 2) 上感应电流的数值,代表了天线 1 (或天线 2) 本身的特性,与外加场强大小无关。因为式(1-71)左端完全由天线 1 的参数组成,右端完全由天线 2 的参数组成。考虑到天线可以是任意类型的,所以式(1-71)表示的天线上述参数的组合式必然等于常数。令该常数为 C ,可得

$$\frac{(Z_L + Z_A) I_r}{I_e F(\theta, \varphi) E} = C \quad (1-72)$$

则接收天线输出电流

$$I_r = C \frac{I_e F(\theta, \varphi) E}{Z_L + Z_A} \quad (1-73)$$

感应电动势(或开路电压)

$$E_i = I_r (Z_L + Z_A) = C I_e F(\theta, \varphi) E \quad (1-74)$$

待定常数 C 可采用任何一种天线来确定。让我们采用电基本振子来确定它。参看图 1-9。设来波电场为 E , 电基本振子上的感应电动势为

$$E_i = E_\theta l \sin \theta \quad (1-75)$$

当电基本振子作发射天线时, $F(\theta, \varphi) = \sin \theta$, $I_e = I$, $E_\theta = E$, 代入式(1-74),得

$$E_i = C I_e F(\theta, \varphi) E = C I E_\theta \sin \theta \quad (1-76)$$

与式(1-75)比较,可得 $C=1$ 。所以式(1-73)和式(1-74)可写成

$$I_r = \frac{I_e E}{Z_L + Z_A} F(\theta, \varphi) \quad (1-77)$$

$$E_i = I_e E F(\theta, \varphi) \quad (1-78)$$

上两式表明,任意类型的线天线用作接收天线时,它的极化、方向性、有效长度和阻抗等均与它用作发射天线时的相同。这种同一天线收发参数相同的性质称为天线收发的互易性。同理可证明这种收发互易性适用于任意类型的天线(包括线天线、面天线等)。

应当指出,收发互易性仅限于同一天线收发参数数值的相同,其工作方式与参数定义却是截然不同的。如,接收天线上的电流分布与它用作发射时的分布不同。接收天线电参数是以来波对接收天线的作用(接收电流 I_r 或感应电动势 E_i)为目标,而不像发射天线电参数是以辐射场参数(电场强度 E 或功率密度 S)为目标。下面列举几种接收天线参数的定义来说明。例如,接收天线的方向性函数,是指在同一距离上不同方向的来波在天线端口感应电动势(或电流)的相对值;有效长度的定义是,最大接收方向上单位来波场强所对应的接收端口感应电动势之值;天线增益的定义是,天线在最大接收方向接收时向负载输出的功率,和该天线无耗时在各个方向接收时输送到负载中的功率平均值之比。以上定义均假定从各个方向传来的电波场强相同。

在讨论接收天线特殊电参数前,有必要介绍接收天线等效电路及其有关的几个概念。

1.4.2 接收天线的等效电路

根据式(1-77)、式(1-78)可绘出接收天线的等效电路,见图1-11。图中 Z_A 是天线用于接收时的内阻抗, Z_L 是接入天线端口的负载阻抗。

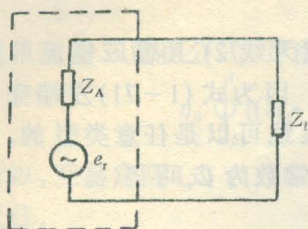


图 1-11 接收天线等效电路

设负载阻抗 $Z_L = R_L + jX_L$, 天线内阻抗 $Z_A = R_A + jX_A$ 。当 Z_L 与 Z_A 共轭匹配时,即 $R_L = R_A, X_L = -X_A$, 接收机处于最佳工作状态。此时接收机输送给负载的功率为

$$P_r(\theta, \varphi) = \frac{1}{2} I_r^2 R_L = \frac{1}{2} \left[\frac{E' l_c F(\theta, \varphi)}{2R_A} \right]^2 R_L$$

$$= \frac{(E' l_c)^2}{8R_A} F^2(\theta, \varphi) \quad (1-79)$$

当天线的最大接收方向与来波方向一致 ($F(\theta, \varphi) = 1$), 且天线极化与来波极化一致, 接收天线将输送给负载最大功率; 或者说, 接收机获得最大接收功率, 即

$$P_{r\max} = E'^2 l_c^2 / 8R_A = E'^2 \lambda^2 D / 960\pi^2 \quad (1-80)$$

式中已代入式(1-53)。

在天线通过馈线与接收机相连的情况下, 通常馈线特性阻抗等于接收机输入阻抗 Z_i ; 当天线阻抗 $Z_{in} \neq Z_L$ 时, 馈线(传输线)上存在电压反射系数 Γ 和电压驻波比 ρ , 则定义阻抗失配因子为阻抗失配与匹配时天线输出功率之比, 即

$$\xi = 1 - |\Gamma|^2 = 1 - \left| \frac{Z_L - Z_A}{Z_L + Z_A} \right|^2 = 1 - \left| \frac{\rho - 1}{\rho + 1} \right|^2 \quad (1-81)$$

前面已涉及极化匹配, 下面将简要说明之。天线极化与来波极化一致称极化匹配, 不一致则称极化失配。只有在极化匹配时接收机才能获得最大接收功率。

天线不能接收与其正交的极化分量。例如, 线极化天线不能接收来波中与其极化方向垂直的线极化分量; 圆极化天线不能接收来波中与其旋向相反的圆极化分量。极化失配时就有传输功率损失。为衡量这种损失特定义极化失配因子。其定义为极化失配时接收天线输出功率与极化匹配时输出最大功率之比。对于线极化接收天线, 当线极化来波的极化方向与天线极化方向之间的夹角为 α 时, 极化失配因子 $v = \cos^2 \alpha$; 而对圆极化来波, 天线只能接收其中与天线极化平行的线极化分量, 故 $v = \frac{1}{2}$ 。根据互易定理, 圆极化天线接收

线极化来波时, 也有 $v = \frac{1}{2}$ 。圆极化天线接收与本身旋向一致的圆极化来波时, $v = 1$, 而反旋圆极化来波时, $v = 0$; 对椭圆极化来波, 只接收其中与天线旋向一致的圆极化分量。

1.4.3 有效面积

接收天线某方向上的有效面积 $S_e(\theta, \varphi)$ 的定义为, 天线的极化与来波极化匹配, 且负载与天线阻抗共轭匹配的最佳状态下, 天线在该方向所接收的功率 $P_r(\theta, \varphi)$ 与入射电波功率密度 S_i 之比。即

责任编辑 王超龙

ISBN 7-5603-1218-7
TN·39 定价 18.00 元

ISBN 7-5603-1218-7



9 787560 312187 >