

康行健 编著

天 线

原理与设计

- 天线工作原理
- 天线电性能
- 天线设计方法
- 线天线
- 天线阵
- 口径天线

北京理工大学出版社



7-05501

天线原理与设计

康行健 编著

北京理工大学出版社

(京)新登字149号

内 容 提 要

本书主要讲述天线的基本原理,三类天线——线天线、天线阵和口径天线的基本分析方法,以及对称振子、环形天线、行波天线、八木天线、螺旋天线、对数周期振子阵、缝隙天线、微带天线、喇叭天线、抛物面天线等典型常用天线的工作原理、电性能与设计方法。并对矩量法(MM)和几何绕射理论(GTD)做了简要介绍。书后附一定数量的习题、计算机程序和必要的附录。

本书适于做高等院校工科电子类“电磁场与微波技术”专业天线课教材,也可供从事天线设计、研制和使用的广大工程技术人员参考。

05/01

天线原理与设计

康行健 编著

*

北京理工大学出版社出版发行

各地新华书店经售

国防科工委印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 16 印张 414 千字

1993年8月第一版 1993年8月第一次印刷

ISBN 7-81013-736-0/TN·38

印数: 1—3000册 定价: 9.40元

前 言

本书参考国内外具代表性的天线课教材，综合其在内容与讲法上的优点，根据“天线原理与设计”大纲编写而成，是作者十余年在北京理工大学讲授天线课的经验结晶。

全书共分十二章。第一、二章讲述天线基础和性能参数，并用互易原理证明同一付天线用作发射和接收时，性能参数相同。第三章讲述几种简单的线天线，为后面的天线阵提供特定型式的阵元。第四、五、六和九章讲述天线阵、线源和口径天线的基本理论和基本分析方法。第七、八、十、十一和十二章讲述各种典型常用天线的组成与用途、工作原理、性能分析和设计方法，是基本理论和基本分析方法的应用与深化。第五章第4节和第九章第7节扼要地介绍两种现代近似计算方法——矩量法和几何绕射理论。书后附一定数量的习题，计算机程序和必要的附录。

本书所采用的天线术语的定义均按照IEEE（电气与电子工程师协会）有关天线术语的标准定义。本书重点讲述基本原理与基本分析方法，注意突出工科院校特点讲述设计方法，注意介绍天线理论的最新发展，并通过习题和所附计算机程序适当地与机辅设计相结合。本书概念清楚，数学推导严格，图文并茂，文笔流畅。

使用本教材的读者应具备电磁场理论、微波技术等专业基础和矢量分析、三角函数与特殊函数、微积分和线性代数等数学基础。

汪茂光教授主审全书，并提出宝贵意见，在此表示衷心感谢，并对刘静贞教授、刘瑞详副教授和康长赓副研究员在编写过程中所给予的大力帮助与支持深表谢意，对北京理工大学出版社

的大力支持表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编 者

1992年12月

目 录

第一章 天线基础	(1)
1.1 电磁场原理	(3)
1.1.1 基本电磁场方程	(3)
1.1.2 边界条件	(5)
1.1.3 坡印廷定理	(6)
1.2 辐射问题麦克斯韦方程的解	(8)
1.3 基本电振子	(10)
第二章 天线的性能参数	(15)
2.1 辐射机理	(15)
2.2 场区的划分	(17)
2.2.1 远场区	(17)
2.2.2 辐射近场区	(19)
2.2.3 感应近场区	(20)
2.2.4 辐射场的求法	(21)
2.3 功率密度与辐射强度	(21)
2.3.1 弧度与立体弧度	(21)
2.3.2 功率密度	(22)
2.3.3 辐射强度	(23)
2.4 发射天线的性能参数	(23)
2.4.1 阻抗和辐射效率	(23)
2.4.2 辐射方向图	(26)
2.4.3 方向性系数与增益	(29)
2.4.4 极化	(32)
2.4.5 带宽	(35)
2.5 接收天线	(36)
2.5.1 工作原理	(36)
2.5.2 等效电路	(36)

2.6	接收天线的性能参数	(37)
2.6.1	方向图	(37)
2.6.2	阻抗	(38)
2.6.3	最大有效口径	(38)
2.6.4	极化失配因子	(39)
2.6.5	阻抗失配因子	(41)
2.6.6	天线温度	(41)
2.7	互易定理及应用	(43)
2.7.1	互易定理	(43)
2.7.2	同一付天线的收发方向图相同	(45)
2.7.3	最大有效口径与方向性系数的关系	(47)
2.8	付里斯传输方程与雷达测距方程	(49)
2.8.1	付里斯传输方程	(49)
2.8.2	雷达测距方程	(49)
第三章	简单线天线	(51)
3.1	短振子	(51)
3.2	对称振子	(53)
3.3	V形振子	(62)
3.4	折合振子	(63)
3.5	小环天线	(68)
3.5.1	二重性原理	(68)
3.5.2	基本磁振子	(70)
3.5.3	小环天线	(71)
3.6	一波长方环天线	(76)
第四章	天线阵的方向性	(84)
4.1	方向图乘积定理	(85)
4.2	二元阵	(86)
4.2.1	间距 $\lambda/2$ 等幅同相二元阵	(86)
4.2.2	间距 λ 等幅同相二元阵	(88)
4.2.3	间距 $\lambda/2$ 等幅反相二元阵	(89)
4.2.4	间距 $\lambda/4$ 相差 90° 的等幅二元阵	(90)
4.2.5	间距 $\lambda/2$ 同相不等幅二元阵	(91)

4.2.6	任意二元阵	(92)
4.2.7	间距 $\lambda/4$ 相差 90° 的等幅二元半波振子阵	(92)
4.3	线性相位渐变等间距线阵	(93)
4.4	均匀激励等间距线阵	(98)
4.5	典型常用均匀激励等间距线阵	(101)
4.5.1	边射阵	(102)
4.5.2	普通端射阵	(103)
4.5.3	汉森-伍德沃德端射阵	(105)
4.5.4	相控阵	(109)
4.6	均匀激励等间距线阵的方向性系数	(112)
4.7	非均匀激励等间距线阵	(115)
4.8	二项式阵	(121)
4.9	道尔夫-切比雪夫线阵	(123)
4.10	平面阵	(131)
4.11	圆阵	(138)
4.12	单元间的互耦及影响	(142)
第五章	对称振子阵的阻抗	(144)
5.1	对称振子的近区场	(145)
5.2	对称振子的输入阻抗	(147)
5.3	对称振子间的互阻抗	(152)
5.4	有限直径振子的阻抗: 矩量法(MM)简介	(157)
5.4.1	积分方程	(157)
5.4.2	矩量法解	(159)
5.4.3	基函数与权函数的选择	(161)
5.5	理想地面上的天线	(166)
5.5.1	镜像原理	(166)
5.5.2	垂直电振子	(169)
5.5.3	水平电振子	(171)
5.5.4	单极振子	(174)
5.6	实际地面上的天线	(174)
第六章	线源	(178)
6.1	均匀线源	(179)

6.2	渐削线源	(186)
第七章	行波天线	(191)
7.1	行波线天线	(191)
7.1.1	行波长线天线	(191)
7.1.2	行波V形天线	(194)
7.1.3	菱形天线	(194)
7.2	螺旋天线	(196)
7.2.1	法向模	(197)
7.2.2	轴向模	(199)
7.3	八木-宇田天线	(207)
7.4	背射天线	(217)
第八章	非频变天线	(221)
8.1	相似原理	(222)
8.2	拉姆西一般形状方程	(223)
8.3	平面等角螺旋天线	(225)
8.4	圆锥等角螺旋天线	(227)
8.5	阿基米德螺旋天线	(229)
8.6	对数周期振子阵	(229)
8.7	其它形式的对数周期天线	(236)
第九章	口径天线基本原理	(239)
9.1	惠更斯原理与等效原理	(239)
9.2	口径天线的辐射场	(243)
9.3	口径天线增益的计算	(248)
9.4	矩形口径	(252)
9.4.1	均匀矩形口径	(252)
9.4.2	渐削矩形口径	(256)
9.5	圆口径	(258)
9.5.1	均匀圆口径	(258)
9.5.2	渐削圆口径	(260)
9.6	口径场相位分布对方向性的影响	(264)
9.6.1	线性相位分布	(264)
9.6.2	平方律相位分布	(266)

9.6.3	立方律相位分布	(267)
9.7	几何绕射理论简介	(268)
9.7.1	几何光学基本原理	(268)
9.7.2	GTD基本原理	(270)
9.7.3	边缘绕射系数	(272)
9.7.4	有限尺寸接地面上的口径	(278)
9.7.5	斜入射边缘绕射	(283)
9.7.6	曲边缘绕射	(285)
第十章	缝隙天线与微带天线	(287)
10.1	巴俾涅原理	(287)
10.2	缝隙天线	(290)
10.2.1	理想缝隙天线	(290)
10.2.2	波导缝隙天线	(293)
10.3	波导缝隙天线阵	(298)
10.3.1	波导缝隙天线阵的型式	(299)
10.3.2	波导缝隙天线阵的设计	(302)
10.4	微带天线概述	(304)
10.5	矩形微带天线	(307)
10.5.1	单缝分析	(308)
10.5.2	矩形微带元分析	(312)
10.5.3	矩形微带元的设计	(315)
10.6	微带天线技术	(316)
10.6.1	宽频带技术	(316)
10.6.2	圆极化技术	(316)
10.6.3	多频段技术	(317)
10.7	微带阵和微带行波天线	(318)
10.7.1	微带阵	(318)
10.7.2	微带行波天线	(318)
第十一章	喇叭天线	(321)
11.1	H-面扇形喇叭	(322)
11.2	F-面扇形喇叭	(330)
11.3	角锥喇叭	(335)

11.4	矩形喇叭天线的设计	(336)
11.5	圆锥喇叭	(339)
11.6	喇叭的相位中心	(342)
11.7	多模喇叭	(334)
11.7.1	对角线喇叭	(345)
11.7.2	阶梯双模圆锥喇叭	(347)
11.7.3	介质加载双模圆锥喇叭	(350)
11.7.4	变张角双模圆锥喇叭	(351)
11.7.5	单脉冲多模馈源	(352)
11.8	波纹喇叭	(354)
第十二章	反射面天线	(361)
12.1	前馈抛物面天线	(361)
12.1.1	几何性质与工作原理	(361)
12.1.2	电性能分析	(364)
12.1.3	增益的计算	(367)
12.1.4	28GHz 前馈抛物面天线	(370)
12.1.5	反射面对馈源的影响与消除方法	(373)
12.2	球形反射面	(375)
12.3	赋形反射面	(378)
12.3.1	赋形柱反射面	(378)
12.3.2	赋形双弯曲反射面	(385)
12.4	卡塞格伦天线	(388)
12.4.1	几何关系与工作原理	(388)
12.4.2	分析方法	(391)
12.4.3	优点与不足	(395)
12.5	其它的反射面天线	(398)
习题	(404)
附录	(418)
A.	通用频率表	(418)
A.1	无线电频率	(418)
A.2	电视频道频率	(418)
A.3	雷达波段	(419)

B.	矢量分析	(420)
B.1	单位矢量表达式	(420)
B.2	矢量恒等式	(420)
B.3	矢量微分算子	(421)
C.	三角和双曲函数关系式	(422)
C.1	三角函数	(422)
C.2	双曲函数	(424)
D.	一些有用的数学关系式	(424)
D.1	狄拉克 δ 函数	(424)
D.2	二项式定理	(424)
D.3	贝塞尔函数	(425)
D.4	一些有用的积分	(425)
E.	函数 $f(x) = \sin x/x$	(427)
F.	函数 $f_N(x) = \sin(N_x)/(N \sin x) $, $N=1, 3, 5, 10, 20$	(429)
G.	正弦和余弦积分	(431)
H.	夫累涅尔积分	(435)
I.	计算机程序	(441)
I.1	DIRECT——方向性系数计算	(441)
I.2	LINE——线源方向图	(447)
I.3	DIPOLE——对称振子的电性能	(455)
I.4	YAGI——八木-宇田天线的设计	(465)
I.5	LPDA——对数周期振子阵的设计	(480)
I.6	HORN——扇形和角锥喇叭的分析与设计	(483)
参考书目	(498)

第一章 天线基础

凡是靠电磁波传递信息的无线电技术设备，如广播、电视、通讯、导航、雷达等，天线是必不可少的组成部分。

根据 IEEE 有关天线术语的标准定义，天线定义为“辐射或接收无线电波的装置”。换言之，天线提供了由传输线上的导行波向“自由空间”波的转换（接收状态反之）。因而可不借助任何中间设备，进行不同地点间的信息传递。除辐射或接收能量外，通常还要求天线能增强某些方向的辐射，并抑制其它方向的辐射。因而，天线除做为辐射器外，还必须具有方向性。为满足特殊需要，天线可以取各种形式，可以是一段导线、一个口径、也可以是辐射元的组合、反射面等。

天线形式多样，种类繁多。为便于分析，一般按分析方法的不同分为三类。

线天线 半径远小于波长的金属导线构成的天线。线天线有各种形式，如直线（对称振子）、圆环、螺旋线等，如图 1.1 所示。

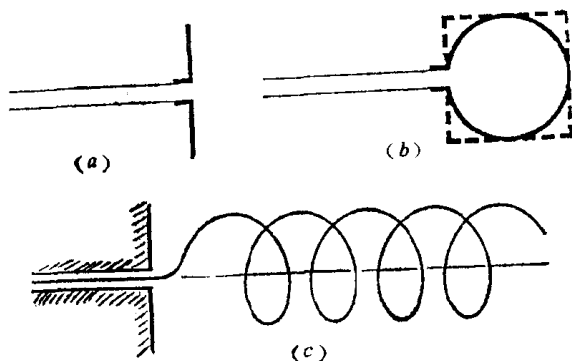


图 1.1 线天线
(a) 对称振子；(b) 圆(方)环；(c) 螺旋天线

口径天线 凡电磁波通过一定口径向外辐射的天线称为口径天线。例如波导口、喇叭、抛物面天线等，如图1.2所示。

天线阵 辐射单元按一定规律排列和激励的天线群体称为天线阵。典型的例子如图1.3所示。

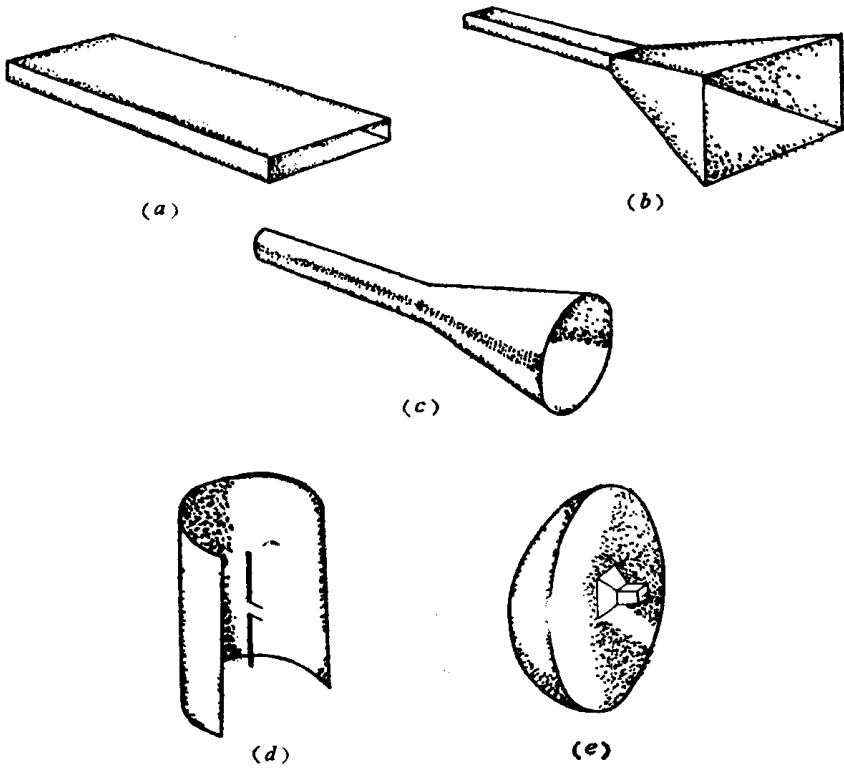
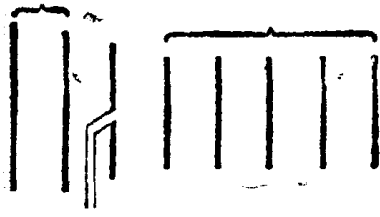


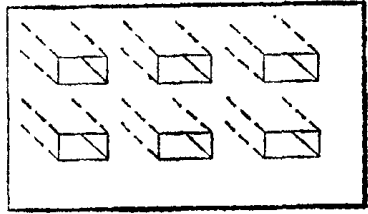
图 1.2 口径天线

(a) 矩形波导口；(b) 角锥喇叭；(c) 圆锥喇叭；(d) 抛物柱面；(e) 前馈抛物面

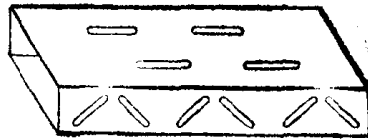
天线理论是建立在麦克斯韦 (MaxWell) 方程的基础上，天线理论所研究的问题实质上是电磁场的边界值问题。本章简要回顾电磁场的基本原理和辐射问题麦克斯韦方程的解。



(a)



(b)



(c)

图 1.3 天线阵
(a) 八木-宇田阵; (b) 口径阵; (c) 波导缝隙阵

1.1 电磁场原理

1.1.1 基本电磁场方程

基本电磁场方程是

$$\nabla \times \mathcal{E} = -\frac{\partial \mathcal{B}}{\partial t} \quad (1-1)$$

$$\nabla \times \mathcal{H} = \frac{\partial \mathcal{D}}{\partial t} + \mathcal{J}_r \quad (1-2)$$

$$\nabla \cdot \mathcal{D} = \rho_T(t) \quad (1-3)$$

$$\nabla \cdot \mathcal{B} = 0 \quad (1-4)$$

$$\nabla \cdot \mathcal{J}_T = -\frac{\partial}{\partial t} \rho_T(t) \quad (1-5)$$

前四个微分方程通常称为麦克斯韦方程，最后一个称为连续性方程。旋度加连续性方程等效于旋度加散度方程。散度方程可由旋度和连续性方程推出。在时变场问题中旋度加连续性方程是最方便的公式。这些微分方程中的每一个均有对应的积分形式。

若源 $\rho_T(t)$ 和 $\mathcal{J}_T(t)$ 随时间以角频率 ω 作正弦变化，场也将作正弦变化，通常称为时谐场。若引入如下的相位复矢量，基本电磁场方程及其解将大为简化。例如

$$\mathcal{E} = \text{Re}(\mathbf{E}e^{j\omega t}), \quad \mathcal{H} = \text{Re}(\mathbf{H}e^{j\omega t}), \quad \text{等等} \quad (1-6)$$

式中 \mathbf{E} 、 \mathbf{H} 、 \mathbf{D} 、 \mathbf{B} 、 ρ_T 和 \mathbf{J}_T 仅是空间坐标的复值函数。在式(1-1)至式(1-5)中采用由式(1-6)所定义的电磁复矢量并消去方程两边出现的 $e^{j\omega t}$ 因子得出

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega \mathbf{B} \quad (1-7)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega \mathbf{D} + \mathbf{J}_T \quad (1-8)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_T \quad (1-9)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1-10)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J}_T = -j\omega \rho_T \quad (1-11)$$

方程式(1-7)至式(1-10)通常称为时谐形式的麦克斯韦方程，因为它们用于随时间作正弦变化（即时谐）的场。

若不止出现一个频率，可以将复矢量作为角频率 ω 的函数求解式(1-7)至式(1-11)，而后通过逆变换求出电磁量的时变形式。然而，在天线问题中一般不需要这样做，因为信号的频带很窄。典型情况是载频加某种形式的调制。为简化分析，我们仅取一个频率，并等于载频。因而，在本书中将假设场为时谐场。

总电流密度由外施、或源、电流密度 \mathbf{J} 和传导电流密度 $\sigma \mathbf{E}$ 组成

$$\mathbf{J}_T = \mathbf{J} + \sigma \mathbf{E} \quad (1-12)$$

假设外施电流密度是已知量。除电导率 σ 外，还用介电常数 ε 和磁导率 μ 表征媒质特性，

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (1-13)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1-14)$$

将(1-12)和(1-13)代入(1-8)给出

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega \left(\varepsilon + \frac{\sigma}{j\omega} \right) \mathbf{E} + \mathbf{J} = j\omega \varepsilon' \mathbf{E} + \mathbf{J} \quad (1-15)$$

式中定义了 $\varepsilon' = \varepsilon - j(\sigma/\omega)$ 。令 ρ 是与源电流密度相对应的源电荷密度。在式(1-7)和式(1-9)至式(1-11)中采用式(1-12)至式(1-14)并重复式(1-15)得出

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega \mu \mathbf{H} \quad (1-16)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega \varepsilon' \mathbf{E} + \mathbf{J} \quad (1-17)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon'} \quad (1-18)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (1-19)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -j\omega \rho \quad (1-20)$$

式(1-16)至式(1-20)是用源电流密度 \mathbf{J} 和源电荷密度 ρ 表示的时谐电磁场方程。

有时引入虚拟的磁流密度 \mathbf{M} 较为方便，此时式(1-16)变为

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega \mu \mathbf{H} - \mathbf{M} \quad (1-21)$$

磁流可作为代替复杂电流的等效源。

1.1.2 边界条件

在结构参数为 ε_1 、 μ_1 、 σ_1 和 ε_2 、 μ_2 、 σ_2 的两种均匀媒质的分界面上，由于结构参数发生突变，某些场分量也将发生突变，它们的空间导数不存在，微分形式的麦克斯韦方程不适用了。可由式(1-17)和式(1-21)的积分形式导出边界条件。

一组充分的边界条件为

$$\hat{n} \times (\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1) = \mathbf{J}, \quad (1-22)$$