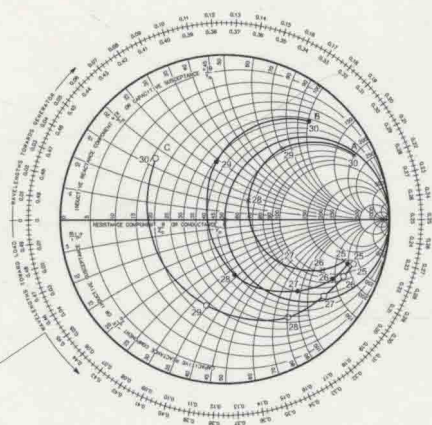


天线手册

(第22版)

【美】美国业余无线电协会 著 / 匡磊 译

THE ARRL ANTENNA BOOK FOR RADIO COMMUNICATIONS



中国工信出版集团



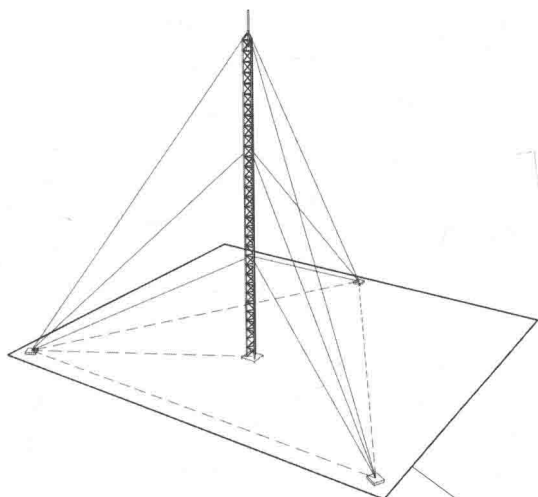
人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

天线手册

(第22版)

【美】美国业余无线电协会 著 / 匡磊 译

THE ARRL ANTENNA BOOK FOR RADIO COMMUNICATIONS



人民邮电出版社

北京

图书在版编目(CIP)数据

天线手册：第22版 / 美国业余无线电协会著；匡磊译. — 北京：人民邮电出版社，2016.4
ISBN 978-7-115-40592-0

I. ①天… II. ①美… ②匡… III. ①天线—技术手册 IV. ①TN82-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第244871号

版权声明

THE ARRL ANTENNA BOOK, 22nd EDITION, ISBN: 978-0-87259-694-8

Copyright © 2011 by The American Radio Relay League, Inc.

All rights reserved. No part of this work may be reproduced in any form except by written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition jointly published by The American Radio Relay League, Inc. and POSTS & TELECOM PRESS.

本书简体中文版由美国业余无线电协会授权人民邮电出版社出版。未经出版者书面许可，不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。版权所有，侵权必究。

内 容 提 要

《天线手册（第22版）》是美国业余无线电协会经典技术手册之一，包含了设计完整的天线系统所需的所有信息。

本书中既有现代天线理论，也含有大量实用的天线设计与制作的实例。通过使用本书，读者不仅可以获得最基本的天线设计知识，如线天线、环形天线、垂直极化天线、八木天线等，并且以这些知识为基础，还可以进一步了解高等天线的理论和应用。

本书译自英文原版第22版，该版经过广泛修订，在原来版本的基础上补充了大量的信息，全新改写了“建造天线系统和铁塔”“地面效应”“移动甚高频和超高频天线”“移动和海事高频天线”等章节，并提供了很多令人兴奋的新天线项目，如C型极子不受地面影响的高频天线，在微波应用中的贴片天线和Vivaldi天线，用于八木天线的一组新的半构件设计等。英文原版书所附光盘文件可到《无线电》杂志官方网站www.radio.com.cn下载。

本书适合业余无线电爱好者阅读，还非常适合天线技术和射频技术等相关专业的工程师、技术人员及大专院校师生阅读，本书的权威内容将为他们的学习与实践提供非常有益的帮助。

-
- ◆ 著 [美] 美国业余无线电协会
 - 译 匡 磊
 - 责任编辑 房 桦
 - 责任印制 周昇亮
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号
 - 邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
 - 网址 http://www.ptpress.com.cn
 - 三河市海波印务有限公司印刷
 - ◆ 开本：880×1230 1/16
 - 印张：50.75 2016年4月第1版
 - 字数：1 690千字 2016年4月河北第1次印刷
 - 著作权合同登记号 图字：01-2013-7917号
-

定价：298.00 元

读者服务热线：(010)81055339 印装质量热线：(010)81055316

反盗版热线：(010)81055315

广告经营许可证：京东工商广字第8052号

专家序

由人民邮电出版社《无线电》杂志社组织翻译的第 22 版的美国业余无线电协会《天线手册》又将面世了。作为一位长期从事天线理论和技术方面的研究与教学工作者,以及该书前一版(第 21 版)译稿的审稿人,我愿意借此机会谈谈对本书的一些看法,或许对读者选择与使用这本手册有所帮助。

当前无线技术与系统在通信、雷达、遥感、导航、物流等领域的应用越来越广泛,天线作为无线系统的不可或缺的关键部件之一,一直受到从事该领域的工程师、学者和有关大专院校的师生的关注。天线技术方面的书籍大致可以分为两类。一类是天线教科书,其注重于天线本身的知识体系结构,适于本科生或研究生的教学应用;另一类是天线专著与天线手册。天线专著主要介绍有关天线方面的研究成果,专业性较强,而天线手册注重于介绍各种具体天线技术、设计方法、制作以及应用等,覆盖面较广。美国业余无线电协会的《天线手册》属于后一类。

从 1939 年出版的第 1 版起,到即将出版的第 22 版《天线手册》的中译本,其间已经历了 70 多年。每一版的内容都有较大的修订与充实,这在科技图书史上是非常少见的。这不但反映了天线理论与技术方面日新月异的进展,而且也充分说明这本手册的生命力与价值。第 22 版的《天线手册》相对于其前一版在内容编排上有较大的调整,从本人的观点看,新版的内容编排更系统、合理,在有关天线和无线电波传播的基础理论方面的内容有了加强。这对天线技术的初学者以及普通天线技术人员无疑是有利的。这本手册的内容非常丰富,总计 28 章的内容涉及了天线和无线电波传播的基础、天线建模与系统规划、多种应用天线、天线阵列、天线材料与附件、天线的接地系统与地面对天线和电波传播的影响、传输线,以及天线与传输线的测量等。

作为一本权威业余无线电协会的天线手册,其主要内容涵盖了业余无线电频段的几乎所有的主要天线形式,如各种振子天线、环天线、八木天线、多波段天线、宽带天线、对数周期阵列、方框阵列、测向天线、便携天线、移动天线和水上天线、中继台天线系统、VHF 和 UHF 天线,以及用于空间通信的螺旋天线和反射面天线等;同时对业余无线电频段(包括 HF、VHF 和 UHF 频段等)的各种电波传播特点与组织通信的方式等给出了详细的描述。虽然该《天线手册》历史悠久,但通过一次次再版的修改与补充,因此内容不乏新的天线和电波传播技术,如相控阵天线的理论与设计实例,如应用当代计算机建模软件分析、设计天线和进行电波传播预测等。

与其他天线类手册不同的是,这本《天线手册》还对如何设计、制作、测试和调试所需要的天线,对架设和维护天线系统提供了相当丰富的信息。在如何应用先进的计算机建模技术,如何选择天线、天线杆的材料,如何注意天线设计、架设和维护中的电气、人身和 RF 安全等各方面都有很详细的介绍。除提供了大量的加工图,给出加工数据之外,甚至还给出了业余条件下物美价廉的替代方法和建议。书中附有很多天线的实例,这不仅对业余无线电爱好者中的动手派是一种福音,也可为天线工程师和天线制造企业提供一种很好的参考。

除了关注业余无线电频段的人员之外,这本手册以其对天线与无线电波传播技术的广泛的覆盖,以及其中一些很有特色内容,对其他从事天线研究与应用的人员,甚至对天线技术的初学者都会有很好的借鉴作用。相信它可以成为我国从事天线技术工作的科技人员、射频工程师以及相关大专院校师生的一本很好的天线参考书。

华东师范大学电子工程系教授 朱守正

译者序

美国业余无线电协会的《天线手册》自 1939 年至今已出到第 22 版。其生命力之强，影响范围之广，自不必言说。译者有幸受编辑部之约，参与了第 21 版《天线手册》的翻译，成书于 2009 年，修订于 2011 年。现今，在第 22 版的翻译过程中，译者发现其在编排和内容上均进行了较大修订与补充。

在编排方面，每一章中均添加了节目录，能让读者很快了解该章的内容结构，且对前一版的部分内容在行文顺序上做了新的安排，更易于读者系统地、连贯地理解与掌握。

在内容方面，秉承《天线手册》的一贯风格，既有理论上对天线系统理论、设计方法和计算机建模分析的介绍，也有制作上对天线类型和相关材料的选择、替代方法、架设和维护天线系统及安全性等细节的详尽介绍。其中，这一版较之前对以下章节做了较大修改和补充：

第 2 章增加了偶极子天线的介绍，详细描述了其基本电参数。

第 3 章修改并补充了地面效应对天线影响的介绍。首先，在近场地面效应中介绍了地表电学特性、土壤趋肤深度、土壤中的波长和馈点阻抗与距地高度的关系。然后，在垂直单极子天线的接地系统中详细补充了线接地系统和架空接地系统。最后，分析了地面条件对安装在较低处的垂直极化天线的重要性，并介绍了获取地面数据的方法。

第 5 章增加了大环天线的介绍，具体给出了方形环天线、三角形环天线、水平环天线和半波环天线的方向图等参数。

第 9 章增加了单波段中、高频不同天线的设计方法。让读者了解各种极化方式的优缺点，可根据相应的环境，做出与设计目标需求相适应的选择。

第 15 章增加了 VHF、UHF 频段八木天线的介绍，讨论了不同工作频段及不同形状的八木天线。

第 16 章介绍了主流的 VHF、UHF 移动天线类型，并讨论了有关安装技术的问题，在旧版基础上进行了修订与更新。

第 17 章介绍了应用于卫星通信和月面反射通信的天线。按天线类型重新对内容进行了编排，并对每种工作类型的具体特点进行了讨论。

第 19 章介绍了更多具有代表性的便携式天线，以及它们的安装方式和支撑方式，通过这些新颖的例子启发读者如何设计满足自身实际需求的便携天线。

第 20 章探讨了在给定环境条件下如何架设最优性能的天线，目的是让读者学习如何利用可用的资源进行实际设计工作。

第 22 章在测向天线的基础上增加了对接收天线的介绍，并对测向天线的内容做了新的修订与编排。

第 26 章增加了在树、桅杆和铁塔上安装天线的方法，及对铁塔和桅杆的设计，还介绍了所涉及的工具、安全和维护问题。

第 28 章详细介绍了天线系统的故障排除方法，为读者提供一些查找问题的系统方法和一般指导原则。

亟此翻译工作完成之际，译者非常感谢华东师范大学信息科学与技术学院朱守正教授的支持与审校。还要感谢本书翻译中与我一起工作的研究生，他们是华东师范大学的张世豪、俞晨洋和王太磊，及复旦大学的黎贵玲和陈昊。此外，华为技术有限公司陈荣标老师和中国科学技术大学集体电台成员参与完成的第 21 版《天线手册》译著为本版的翻译提供了大量有用参考，译者对此表示诚挚的感谢。鉴于译者时间和经验的限制，书中难免译词不妥，敬请读者不吝指正。

匡磊

2015 年 10 月
于华东师范大学

前言

早在第二次世界大战前，随着业余通信服务的增长，《业余无线电手册（The ARRL Handbook）》这本在当今包罗万象的技术参考资料就已经开始发展了。这本第一部致力于天线、传输线及无线电波传播的参考书令人关注。ARRL《天线手册》（第1版）于1939年出版，阐述了当今业余爱好者都了解的一点——天线及其相关技术的概念和系统是业余无线电成功的关键。对这些技术的关注使ARRL《天线手册》至今出版到第22版。

天线不但是业余无线电的基础，还激发了业余爱好者的兴趣，使他们期望尝试一系列不断完善设计和配置的开发和制作。甚至在一个电子小型化和软件复杂化的时代，每一位业余爱好者仍能获取天线系统的一些服务。美国联邦通信委员会中的关于业余通信服务的基础和目的，明确说明了“业余爱好者能力的延续和扩展有助于无线电技术的进步。”天线处于实现这一目标的最前端。

本版《天线手册》保持了70多年前建立的传统，即总结了大量业余爱好者团体感兴趣的 antenna 技术。本书既能用作教学资料，也能作为天线系统的设计说明及相关信息的原始资料。在本书中，你会看到由知识渊博、经验丰富的业余爱好者提供的理论资料以及实用的、亲身实践的建议——仅在文本中就列出或引用了213位不同作者的作品。我们重新编排了新稿件以及先前版本中的内容，以提供一个更有效的、紧密结合实际设计的学习经验。

特别是，我们有幸在书中包含了EZNEC ARRL 5.0 天线建模软件，作者是 oyLewallen (W7EL)，他获得了2011年美国业余无线电节 Dayton Hamvention 技术卓越奖。天线建模从根本上改变了天线的设计和发展，同时EZNEC软件设立了业余标准。一整章的天线建模和 Greg Ordly (W8WWV) 拓展的EZNEC教程也包含在原版书的光盘文件中。由本书前编辑 Dean Straw (N6BV) 编写的一款流行软件，也包含在本版中：HFTA（高频地形分析）、TLW（Windows 系统下的传输线）和 YW（Windows 系统下的八木天线）。（注：原版书附加光盘文件可到《无线电》杂志网站 www.radio.com.cn 查询下载。）

你也会注意到，我们更多地使用了友好组织英国广播协会（RSGB）的内容。RSGB 的出版物以其质量而闻名，并且提供了天线主题的不同观点和处理方式。澳大利亚无线电研究所（WIA）的文章亦有出现。我们非常感谢他们在新版本中给予的支持。

天线系统设计是该版本的一个新重点。先前分布在全书的内容已被集中到一个单独的章节“高频天线系统设计”中，涉及了当地地形的影响、天线高度、地面电导率、预期覆盖的“足迹”和其他类似的主题。本书帮助业余爱好者或专业人士在选择天线系统的部件时做全面的考虑，使他们做出更好的选择，实现理想的通信目的。

全新和完全重写的内容包括：

- Steve Morris (K7LXC) 编写的“建造天线系统和铁塔”。
- Rudy Severns (N6LF) 编写的“地面效应”，包括辐射系统和架高地网的一个主要更新。
- Alan Applegate (KØBG) 编写的“移动的甚高频和超高频天线”。
- 以及由 Alan Applegate (KØBG) 和 Rudy Severns (N6LF) 重新编写的“移动和海事高频天线”章节。
- 天线系统材料和服务的供应商表格已经更新，可在本书的新网站上进行下载：www.arrl.org/antenna-book。

在“便携式天线”以及“隐身和有限空间的天线”等新章节中，我们可以认识天线使用和新安装的新途径。这些章节在未来的版本中肯定会有所扩展。一个长期未被强调但对所有业余爱好者和专业人士都有价值的领域现在也有了自己的章节——“天线系统的故障排除”。

ARRL《天线手册》的每一个版本都以一些令人兴奋的新天线项目为特征。本版包含了 Brian Cake (KF2YN) 的 C 型极子不受地面影响的高频天线；在微波应用中的贴片天线和 Vivaldi 天线；Kent Britain (WA5VJB) 的著名的用于甚高频和超高频的“廉价八木天线”；Dave Leeson (W6NL) 的 40m 莫克森横梁；John Stanley (K4ERO) 的电视到业余无线电的对数周期转换天线；Gary Breed (K9AY) 的环天线设计的细节处理；Stan Stockton (K5GO) 的用于八木天线

的一组新的半构件设计。

本书的结构遵循 2011 年的《业余无线电手册》的改进布局——有一个更加详细的主目录并且在每章开头都有一个，编号分为三层，使本书浏览起来更容易。

我们希望你能够认同这个新版本的 ARRL《天线手册》，它不只是紧跟业余无线电中天线技术的步伐，包括新的内容和软件，而且还为了更好学习和应用进行了重新编排，所有这些都是为了能本书成为一个更有用的参考和学习工具。哪里有业余无线电，哪里就一定有天线，同样哪里也一定有 ARRL《天线手册》。

David Sumner(K1ZZ)

首席执行官

纽因顿，康涅狄格州

目 录

第 1 章 天线基本理论	1	2.3 参考文献	36
1.1 电磁场和电磁波的介绍	1	第 3 章 地面效应	37
1.1.1 电场和磁场	1	3.1 近场地面效应	37
1.1.2 传导电流和位移电流	2	3.1.1 地表的电学特性	37
1.1.3 电磁波	2	3.1.2 土壤趋肤深度	39
1.2 天线阻抗	5	3.1.3 土壤中的波长	40
1.2.1 辐射阻抗	5	3.1.4 馈点阻抗与距地高度	40
1.2.2 电流和电压分布	5	3.2 垂直单极子天线的接地系统	41
1.2.3 馈电点阻抗	5	3.2.1 天线底部附近的场	41
1.3 天线方向性和增益	6	3.2.2 辐射效率及土壤中的能量损耗	42
1.3.1 各向同性辐射	6	3.2.3 线接地系统	44
1.3.2 方向性和辐射方向图	6	3.2.4 架空接地系统	48
1.3.3 近场和远场	7	3.2.5 不同地网系统间的差异	53
1.3.4 辐射方向图的类型	8	3.3 远场地面效用	54
1.3.5 方向性和增益	10	3.3.1 一般反射	54
1.3.6 辐射方向图的测量	12	3.3.2 远场反射和垂直天线	54
1.4 天线极化	12	3.3.3 PSEUDO-BREWSTER 角 (PBA) 与 垂直天线	56
1.5 其他天线特征	13	3.3.4 平表面反射和水平极化波	57
1.5.1 收发互易性	13	3.3.5 真实地表条件下的方向图	58
1.5.2 天线带宽	14	3.4 天线分析中的地面参数	61
1.5.3 频率缩放	14	3.4.1 地面条件的重要性	61
1.5.4 有效辐射功率 (ERP)	15	3.4.2 获取地面数据	62
1.6 射频辐射和电磁场安全问题	15	3.5 参考文献和参考书目	65
1.6.1 射频能量的热效应	16	第 4 章 无线电波传播	67
1.6.2 电磁辐射的非热效应	16	4.1 无线电波的性质	67
1.7 参考文献	22	4.1.1 无线电波的弯曲	67
第 2 章 偶极天线和单极天线	24	4.1.2 地波	68
2.1 偶极天线	24	4.1.3 表面波	68
2.1.1 辐射方向图	25	4.1.4 空间波	68
2.1.2 导体直径的影响	27	4.1.5 视线外的 VHF/UHF 传播	69
2.1.3 馈点阻抗	28	4.1.6 天线极化	70
2.1.4 频率对辐射方向图的影响	31	4.1.7 甚高频无线电波远距离传播	71
2.1.5 折合偶极天线	33	4.1.8 可靠的甚高频覆盖	73
2.1.6 垂直偶极天线	33	4.1.9 极光传播	76
2.2 单极天线	34	4.2 高频天线传播	77
2.2.1 $\lambda/4$ 单极天线的特性	34	4.2.1 太阳的作用	77
2.2.2 折合单极天线	36		

4.2.2	电离层	81	6.1.2	互阻抗	131
4.2.3	探测电离层	82	6.1.3	互阻抗和增益	131
4.2.4	跳跃传播	85	6.1.4	增益和天线的外形尺寸	132
4.2.5	多次跳跃传播	85	6.2	激励单元	133
4.2.6	非跳跃传播模式	86		相控阵中的电流分布	133
4.2.7	最高可用频率 (MUF)	86	6.3	相控阵技术	136
4.2.8	最低可用频率 (LUF)	87	6.3.1	概述	136
4.2.9	受干扰电离层的条件	88	6.3.2	相控阵基本理论	136
4.2.10	电离层 (地磁) 暴	89	6.3.3	给相控阵馈电	139
4.2.11	单路径传播	89	6.3.4	一般的相控阵馈电系统	140
4.2.12	长路径和短路径传播	89	6.3.5	业余阵列的推荐馈电方法	142
4.2.13	灰线传播	90	6.4	相控阵设计实例	148
4.2.14	衰落	91	6.4.1	通用的阵列设计考虑	148
4.2.15	突发 E 层和低频散射模式	91	6.4.2	90° 馈电、90° 间隔的垂直阵列	149
4.3	何时何地高频波段是开放的	92	6.4.3	3 单元二项式边射阵	151
4.3.1	传播整体视图	92	6.4.4	四方阵列	152
4.3.2	高频通信仰角	95	6.4.5	4 单元矩形阵列	154
4.3.3	传播预测表	99	6.4.6	120° 馈电、60° 间隔的偶极天线阵列	155
4.4	传播预测软件	102	6.4.7	“Crossfire” 接收阵列	156
	太阳活动数据	103	6.5	相控设计的实际问题	157
4.5	参考文献	104	6.5.1	调整相控阵馈电系统	157
第 5 章	环形天线	106	6.5.2	阵列的方向切换	159
5.1	大环天线	106	6.5.3	测量馈线的电长度	161
5.1.1	方形环天线	106	6.5.4	测量单元的自阻抗和互阻抗	162
5.1.2	三角形环天线	110	6.6	参考文献	162
5.1.3	水平环天线	115		附录——EZNEC-ARRL 实例	163
5.1.4	半波环形天线	115	第 7 章	对数周期偶极天线阵列	165
5.2	小环天线	116	7.1	基本 LPDA 设计	165
5.2.1	基本环天线	116	7.1.1	LPDA 设计和计算	167
5.2.2	调谐环天线	117	7.1.2	LPDA 的性能	170
5.2.3	静电屏蔽环天线	118	7.1.3	LPDA 的馈电和架设	171
5.2.4	环的 Q 值	119	7.1.4	特别设计校正	172
5.3	铁氧体磁芯环天线	120	7.2	设计一个 LPDA	174
5.4	环天线阵列	123	7.3	参考文献	175
5.4.1	测向判决单元	123	第 8 章	天线建模	176
5.4.2	环的相控阵	123	8.1	概述: 用计算机分析天线	176
5.4.3	交叉环	123		天线建模简史	176
5.4.4	间隔排列的环天线阵列	123	8.2	天线建模基础	178
5.4.5	非周期性阵列	123	8.2.1	程序输出	178
5.5	小型发射环天线	124	8.2.2	程序输入: 导线几何学	180
5.6	参考文献	126	8.2.3	建模环境	185
第 6 章	多元天线阵列	128	8.2.4	再述源的说明	187
6.1	创建增益和方向性	128	8.2.5	负载	188
6.1.1	定义	129	8.2.6	精确测试	189

8.2.7 其他可能的模型限制	190	10.1.10 水平环天线 “SkyWire”	240
8.2.8 进场输出	191	10.2 陷波器天线	242
第9章 单波段中频和高频天线	193	10.2.1 陷波器的损耗	244
9.1 水平天线	194	10.2.2 五波段的 W3DZZ 陷波器天线	244
9.1.1 偶极子天线	194	10.2.3 W8NX 多波段、同轴电缆-陷波器偶极 天线	244
9.1.2 折叠偶极子天线	196	10.3 多波段垂直天线	249
9.1.3 倒 V 形偶极子天线	197	10.3.1 全尺寸垂直天线	249
9.1.4 端馈 ZEPP 天线	197	10.3.2 短垂直天线	250
9.1.5 倾斜偶极子天线	198	10.3.3 陷波器垂直天线	250
9.1.6 宽带偶极子天线	199	10.4 开放式套筒天线	251
9.2 垂直天线	202	10.4.1 阻抗	251
9.2.1 半波长垂直偶极子天线 (HVD)	202	10.4.2 带宽	252
9.2.2 C 形极子天线	203	10.4.3 辐射方向图与增益	253
9.2.3 使用镜像平面径向辐射器的单极子垂直 天线	204	10.4.4 制作与评估	253
9.2.4 镜像平面天线	206	10.5 耦合谐振器偶极天线	253
9.2.5 垂直天线实例	208	10.5.1 耦合谐振器原理	253
9.2.6 架高镜像平面天线	211	10.5.2 耦合谐振器 (C-R) 天线的特性	255
9.3 加载技术	213	10.5.3 一个 30m/17m/12m 波段偶极天线	256
9.3.1 加载垂直天线	213	10.6 高频对数周期偶极天线阵列	257
9.3.2 基端加载短垂直天线	213	10.6.1 3.5MHz 或 7.0MHz 的 LPDAs	257
9.3.3 加载短垂直天线的其他方法	213	10.6.2 五波段对数周期偶极天线阵列	260
9.3.4 加载垂直天线的原则	216	10.7 高频盘锥天线	261
9.3.5 线性负载	216	10.7.1 盘锥天线的基础知识	261
9.4 倒 L 形天线	218	10.7.2 A 型框架——10 ~ 20m 波段的盘锥 天线	262
9.5 单边斜拉天线	220	10.7.3 40 ~ 10m 波段的盘锥天线	262
1.8MHz 塔基天线系统	222	10.8 参考文献	264
9.6 单波长回路天线	224	第11章 高频八木天线和方框天线	266
9.6.1 7MHz 全尺寸回路天线	224	11.1 八木天线	266
9.6.2 水平极化矩形回路天线	225	11.1.1 八木天线如何工作——概述	266
9.6.3 14MHz 垂直极化三角形回路天线	226	11.1.2 八木天线建模	267
9.7 参考文献	228	11.2 八木天线的性能参数	267
第10章 多波段高频天线	230	11.2.1 八木天线增益	267
10.1 简单线天线	230	11.2.2 辐射方向图的测量	268
10.1.1 随机线天线	230	11.2.3 馈电点阻抗和 SWR	270
10.1.2 端馈天线	232	11.3 单波段八木天线性能优化	270
10.1.3 中馈天线	232	11.3.1 八木天线的设计目标	270
10.1.4 137 英尺的 80 ~ 10m 波段偶极天线	233	11.3.2 增益和主梁长度	271
10.1.5 G5RV 多波段天线	235	11.3.3 最优设计和单元间距	274
10.1.6 温顿天线和卡罗莱纳-温顿天线	236	11.3.4 单元调谐	275
10.1.7 偏离中心馈电 (OCF) 天线	237	11.4 单波段八木天线	275
10.1.8 多重偶极天线	238	11.4.1 10m 波段八木天线	277
10.1.9 端接折合偶极天线	240	11.4.2 12m 波段八木天线	279

11.4.3	15m 波段八木天线	281	第 13 章	长线 and 行波天线	331
11.4.4	17m 波段八木天线	284	13.1	概述	331
11.4.5	20m 波段八木天线	285	13.1.1	长线天线 VS 多元阵	331
11.4.6	30m 波段八木天线	286	13.1.2	长线天线的一般特性	331
11.4.7	40m 波段八木天线	288	13.1.3	长线天线的馈电	335
11.4.8	改进型单波段 Hy-gain 八木天线	291	13.2	长线天线的组合	335
11.5	多波段八木天线	293	13.2.1	平行线天线	335
11.6	缩短型八木天线的单元	295	13.2.2	V 形定向天线	335
11.7	Moxon 矩形天线	296	13.3	谐振菱形天线	338
	40m 波段的矩形天线	296	13.4	端接长线天线	339
11.8	方框天线	297	13.5	项目: 10m 到 40m 的 4 单元可转向 V 形定向 天线	344
11.8.1	方框天线 VS 八木天线	297	13.6	参考文献	346
11.8.2	多波段方框天线	299	第 14 章	高频天线系统的设计	347
11.8.3	制作方框天线	300	14.1	系统设计基本知识	347
11.9	两种多波段方框天线	301	14.1.1	需要和限制	347
11.9.1	主梁长为 26 英尺的 5 单元三波段天线	302	14.1.2	架设点规划	348
11.9.2	主梁长为 8 英尺的 2 单元五波段天线	304	14.1.3	初始分析	348
11.10	参考文献	306	14.1.4	架设天线系统的规划	349
第 12 章	垂射天线阵和端射天线阵	308	14.1.5	建模交互	349
12.1	边射阵	308	14.1.6	折中考虑	351
12.1.1	共线阵	308	14.1.7	系统设计示例	352
12.1.2	2 单元阵列	309	14.1.8	实验测试	352
12.1.3	3 单元和 4 单元阵列	309	14.2	传播和覆盖范围	353
12.1.4	调节	310	14.2.1	低波段 DX 通信的仰角	353
12.1.5	扩展的双 Zepp	310	14.2.2	NVIS 通信	355
12.1.6	司梯巴阵	313	14.3	本地地形影响	361
12.2	平行边射阵	313	14.3.1	为 DX (远距离通信) 选择 QTH (电台位置)	361
12.2.1	功率增益	313	14.3.2	所需仰角的范围	362
12.2.2	方向性	314	14.3.3	真实地形下计算机模型的不足	364
12.3	其他形式的边射阵	314	14.3.4	不均匀地形下的射线追踪	364
12.3.1	非均匀单元电流	314	14.3.5	仿真示例	366
12.3.2	半平方天线	315	14.3.6	使用 HFTA	369
12.3.3	截尾帘天线	319	14.4	堆叠八木天线和开关系统	371
12.3.4	Bruce 阵	320	14.4.1	堆叠和增益	371
12.3.5	4 单元边射阵	323	14.4.2	堆叠和宽仰角覆盖范围	372
12.3.6	双平方天线	324	14.4.3	避免零点	374
12.4	端射阵	324	14.4.4	八木天线间的堆叠间距	375
12.4.1	2 单元端射阵	325	14.4.5	主瓣外的辐射	378
12.4.2	W8JK 阵列	326	14.4.6	现实世界的地形和堆叠	380
12.4.3	4 单元端射阵和共线阵	327	14.4.7	堆叠三波段天线	381
12.4.4	4 单元激励阵	328	14.4.8	堆叠不同的八木天线	383
12.4.5	8 单元激励阵	328	14.4.9	WX0B 使用的堆叠切换	383
12.4.6	阵元中的相位箭头	329			
12.5	参考文献	329			

14.4.10 其他主题	384	17.1.2 月面反射通信 (EME) 天线系统	463
第 15 章 VHF 和 UHF 天线系统	386	17.2 圆极化天线	465
15.1 甚高频以上的设计因素	386	17.2.1 交叉线性天线	466
15.1.1 天线	386	17.2.2 打蛋器天线	468
15.1.2 传输线	387	17.2.3 旋转门型天线	468
15.1.3 阻抗匹配	388	17.2.4 Lindenblad 天线	468
15.1.4 巴伦	389	17.2.5 四臂螺旋天线 (QFH)	469
15.2 基本甚高频和超高频天线	390	17.2.6 螺旋天线	470
15.2.1 接地天线	390	17.3 八木天线阵	473
15.2.2 J 极天线	391	17.3.1 卫星通信八木天线阵	473
15.2.3 共线阵	393	17.3.2 EME 天线阵	474
15.3 VHF、UHF 频段八木方形天线	397	17.4 抛物面天线 (dish)	475
15.3.1 层叠八木天线	397	17.4.1 Dish 天线基础	475
15.3.2 50MHz 八木天线	402	17.4.2 Dish 天线构建	476
15.3.3 144MHz 和 432MHz 八木天线的应用	403	17.4.3 抛物面天线馈源	479
15.3.4 低成本 WA5VJB 八木天线	405	17.4.4 卫星通信 Dish 天线	482
15.3.5 144MHz、222MHz 和 432MHz 高性能八木 天线	409	17.4.5 C-Band TVRO 抛物面天线	483
15.3.6 框形天线	421	17.4.6 12 英尺应力抛物面天线	486
15.3.7 环形八木天线	424	17.5 继电器和前置放大器的防雨措施	487
15.3.8 VHF 框形天线	427	17.6 天线位置控制	488
15.4 对数周期天线和锥形天线	430	17.6.1 位置控制器	488
15.5 反射器天线	432	17.6.2 俯仰控制	489
15.5.1 角反射器	432	17.7 参考文献	490
15.5.2 槽形反射器	435	第 18 章 中继台天线系统	493
15.6 微波天线	436	18.1 中继台天线的基本概念	493
15.6.1 波导	436	18.1.1 水平与垂直极化	493
15.6.2 角锥喇叭天线和抛物面天线	438	18.1.2 传输线	493
15.6.3 开槽天线	443	18.1.3 匹配	493
15.6.4 贴片天线	444	18.2 中继台天线的系统设计	494
15.6.5 潜望镜天线系统	445	18.2.1 中继台天线覆盖区域的计算	494
15.7 参考文献	447	18.2.2 中继台天线的方向图	494
第 16 章 VHF 和 UHF 移动天线	449	18.2.3 隔离系统	498
16.1 VHF-UHF FM 天线	449	18.2.4 独立天线隔离	499
16.2 鞭状天线的天线座	451	18.2.5 腔体谐振器隔离	500
16.3 项目: VHF 和 UHF 移动鞭状天线	454	18.2.6 双工器隔离	500
16.3.1 VHF 和 UHF $1/4\lambda$ 鞭状天线	454	18.3 先进技术	502
16.3.2 2m 波段 $5/8\lambda$ 鞭状天线	454	18.3.1 耦合器	502
16.3.3 222MHz $5/8\lambda$ 移动鞭状天线	456	18.3.2 中继台的分集技术	503
16.4 项目: 2m 波段大轮天线	457	18.4 全向有效辐射功率 (EIRP)	503
16.5 项目: 6m 波段 halo 天线	459	18.5 中继台天线系统的装配	504
第 17 章 空间通信天线	461	18.5.1 频率协调	504
17.1 空间通信天线系统	461	18.5.2 中继台建造者的资源	505
17.1.1 卫星通信天线系统	461	18.6 参考文献	505

第 19 章 便携式天线	506	21.2.2 单波段天线	543
19.1 水平天线	506	21.2.3 天线的安装	546
19.1.1 拉链式天线和馈线	506	21.2.4 移动天线的控制器和调谐器	548
19.1.2 双芯折叠偶极子天线	508	21.3 高频移动天线的参考文献	549
19.1.3 便携式倒 V 天线	508	21.4 高频帆船和汽艇天线	549
19.1.4 便携式鞭形偶极子天线	509	21.4.1 规划安装	549
19.2 垂直天线	510	21.4.2 天线选择	551
19.2.1 安装在树上的 HF 接地平面天线	510	21.4.3 天线调谐器	552
19.2.2 HF 垂直旅行天线	511	21.4.4 索具和桅杆的影响	553
19.2.3 车载紧凑型 40m 环天线	512	21.4.5 临时天线	554
19.3 波束天线	513	21.4.6 接地系统	554
19.3.1 便携式 6m 波段二单元方形天线	513	21.4.7 汽艇天线	555
19.3.2 20m/15m/10m 三波段 2 单元八木天线	514	21.5 高频海事天线的参考文献	556
19.3.3 15m 波段 black widow 波束天线	515	第 22 章 接收和测向天线	557
19.4 便携式桅杆和支撑架	516	22.1 接收天线	557
19.5 参考文献	517	22.1.1 贝威尔基天线	557
第 20 章 隐形和有限空间天线	519	22.1.2 K6STI 环天线	564
20.1 安装安全	519	22.1.3 EWE 天线	564
20.1.1 电气安全	519	22.1.4 K9AY 环天线	564
20.1.2 人身安全	520	22.1.5 旗帜和三角旗天线	567
20.1.3 RF 安全	520	22.1.6 1.8MHz 接收环天线	568
20.2 天线位置	521	22.1.7 有源天线	570
20.3 RF 干扰	521	22.1.8 接收天线参考文献	570
20.4 室内天线	522	22.2 测向天线	571
20.4.1 室内 HF 线天线	522	22.2.1 三角测量法	572
20.4.2 室内移动 HF 天线	524	22.2.2 测向天线	572
20.4.3 室内 VHF 和 UHF 天线	525	22.2.3 测向天线阵	575
20.5 户外天线	526	22.2.4 RDF 系统的校准和使用	577
20.5.1 不可见天线	526	22.2.5 框形环天线	577
20.5.2 伪装天线	527	22.2.6 160m 波段铁氧体磁芯环天线	578
20.6 小型发射环天线	527	22.2.7 80m 波段测向系统	580
20.6.1 实际小型发射环天线	528	22.2.8 DOUBLE-DUCKY VHF 测向仪	
20.6.2 一般发射环天线构建	530	(DDDF)	581
20.7 参考文献	531	22.2.9 八木天线-干涉计组合 VHF 天线	583
第 21 章 移动和海事高频天线	532	22.2.10 2m 波段卷尺八木天线	583
21.1 高频移动天线的基础知识	532	22.2.11 测向天线参考文献	585
21.1.1 典型移动天线的等效电路	533	第 23 章 传输线	586
21.1.2 加载型短移动天线	534	23.1 传输线基本理论	586
21.1.3 短移动天线的辐射阻抗	535	23.1.1 长传输线中的电流	587
21.1.4 优化加载线圈的电感值和位置	537	23.1.2 传播速度	588
21.1.5 辐射效率	539	23.1.3 阻抗特性	588
21.1.6 阻抗匹配	541	23.1.4 终止线	589
21.2 高频移动天线的类型	543	23.2 实际传输线	591
21.2.1 螺丝刀天线	543	23.2.1 衰减	591

23.2.2 反射系数	591	24.4.5 多个 $\lambda/4$ 阻抗变换器级联	641
23.2.3 驻波	592	24.5 天线中的阻抗匹配	641
23.2.4 附加能量损失取决于驻波比	594	24.5.1 天线阻抗匹配	642
23.2.5 传输线电压和电流	596	24.5.2 与天线直接连接	642
23.2.6 输入阻抗	596	24.5.3 Δ 形匹配	643
23.2.7 特殊情况	599	24.5.4 折合振子	643
23.2.8 沿线的电压和电流	599	24.5.5 T 形和 Γ 形匹配	644
23.3 馈线传输线结构和操作特性	600	24.5.6 Ω 形匹配	646
23.3.1 空气绝缘传输线	600	24.5.7 发夹形和 β 形匹配	646
23.3.2 柔软性传输线	602	24.5.8 匹配短截线	648
23.3.3 同轴电缆	603	24.5.9 谐振电路匹配	650
23.4 射频 (RF) 连接器	608	24.5.10 宽带匹配	650
23.4.1 UHF 连接器	608	24.6 共模传输线电流	651
23.4.2 其他设备连接器	610	24.6.1 不平衡同轴线对一个平衡偶极子天线进行 馈电	651
23.5 选择和安装馈线	613	24.6.2 偶极子天线馈线的不对称布线	653
23.5.1 馈线对比	613	24.6.3 定向天线的共模影响	654
23.5.2 安装同轴电缆	615	24.7 扼流圈巴伦	655
23.5.3 安装平行线线路	616	24.7.1 同轴扼流圈巴伦	657
23.5.4 测试传输线	617	24.7.2 传输铁氧体磁芯扼流圈巴伦	658
23.6 参考文献	617	24.7.3 在扼流圈巴伦中使用铁氧体磁珠	661
第 24 章 传输线耦合和阻抗匹配	619	24.7.4 测量扼流圈巴伦的阻抗	662
24.1 发射机和传输线的耦合	619	24.8 传输线巴伦	663
24.1.1 阻抗匹配系统	620	24.8.1 失谐套筒	663
24.1.2 天线调谐器中的谐波衰减	620	24.8.2 $\lambda/4$ 和 $3\lambda/4$ 巴伦	664
24.1.3 驻波比的神秘面纱	621	24.8.3 巴伦和匹配短截线组合	664
24.2 阻抗匹配网络	622	24.8.4 阻抗提升/下降巴伦	665
24.2.1 L 形网络	622	24.9 电压巴伦	666
24.2.2 π 形网络	623	24.10 参考文献	667
24.2.3 T 形网络	623	第 25 章 天线材料和建造	668
24.2.4 TLW (Windows 系统下的传输线) 软件 和天线调谐器	625	25.1 线天线	668
24.2.5 AAT (分析天线调谐器) 软件	625	25.1.1 导线的类型	668
24.2.6 平衡的天线调谐器	628	25.1.2 导线尺寸和张力的	669
24.2.7 项目: 大功率 ARRL 天线调谐器	629	25.1.3 导线的捻接	671
24.2.8 通用天线调谐器的设计	632	25.1.4 天线绝缘子	671
24.3 传输线系统设计	634	25.2 铝管天线	673
24.3.1 传输线的选择	634	25.2.1 选择铝管	674
24.3.2 天线调谐器的位置	636	25.2.2 铝管来源	675
24.3.3 使用 TLW 确定 SWR	638	25.2.3 使用铝管建造天线	675
24.4 传输线匹配设备	638	25.3 天线架设的其他材料	680
24.4.1 $\lambda/4$ 阻抗变换器	638	25.3.1 木材和竹子	680
24.4.2 $\lambda/12$ 阻抗变换器	639	25.3.2 塑料	680
24.4.3 串联阻抗变换器	639	25.3.3 玻璃纤维	681
24.4.4 锥形传输线	640	25.4 硬件	681

25.5 参考文献	681	26.8.2 控制电缆	723
第 26 章 建造天线系统和铁塔	683	26.8.3 防风雨的射频连接器	723
26.1 安全和安全设备	683	26.8.4 胶带和系带	724
26.1.1 防跌落设备	683	26.9 腐蚀	725
26.1.2 安全攀爬铁塔	684	26.9.1 抗氧化剂	725
26.1.3 安全地工作	685	26.9.2 生锈	726
26.1.4 安全设备	687	26.10 日常维护	726
26.1.5 保险	687	26.10.1 年检	726
26.2 树木和天线杆	687	26.10.2 升降器维护	727
26.2.1 树木	687	26.10.3 旋转器维护	727
26.2.2 安装在地面上的天线杆和极点	689	26.10.4 当某物失效	727
26.2.3 天线杆的固定	690	26.11 参考文献	728
26.3 铁塔的种类	691	附录 A 确定天线的面积和风力负载	729
26.3.1 屋顶式铁塔	692	附录 B 计算天线杆的强度	731
26.3.2 自立式铁塔	693	第 27 章 天线及传输线测量	733
26.3.3 拉线式铁塔	694	27.1 线路电流和电压	733
26.4 设计铁塔项目	695	27.1.1 射频电压表	733
26.4.1 地点的规划与准许	695	27.1.2 射频测流计	734
26.4.2 选择一个铁塔	696	27.1.3 射频电流表	735
26.4.3 设计拉线	697	27.2 驻波比的测量	736
26.4.4 设计基底	697	27.2.1 桥式电路	736
26.4.5 设计天线杆	698	27.2.2 驻波比测量桥式电路	739
26.4.6 旋转器	699	27.2.3 避免驻波比测量中的错误	741
26.4.7 地面系统	700	27.2.4 反射计	742
26.5 工具和设备	701	27.3 射频功率的测量	743
26.5.1 铁塔工具箱	701	27.3.1 直接功率/驻波比测量表	743
26.5.2 专业的铁塔工具	702	27.3.2 高功率射频采样器	745
26.5.3 使用起重架	704	27.3.3 廉价的 VHF 定向耦合器	746
26.5.4 绳子和绳子保养	704	27.3.4 射频分压器	747
26.5.5 绳结	706	27.4 场强测量表	749
26.5.6 滑轮	707	27.5 噪声桥和天线分析仪测量	752
26.6 铁塔建造	707	27.5.1 使用噪声桥	752
26.6.1 LXC 最高指导原则	707	27.5.2 使用天线分析仪	753
26.6.2 基底的挖掘和钢筋	708	27.6 时域反射计	755
26.6.3 基底的混凝土	709	27.6.1 时域反射计 (TDR) 如何工作	755
26.6.4 使用拉线工作	710	27.6.2 校准和使用时域反射计	758
26.6.5 在铁塔上工作之前	714	27.6.3 时域反射计的缺陷	759
26.6.6 组装铁塔	716	27.7 矢量网络分析仪	759
26.7 升高和降低天线	717	27.7.1 S 参数	759
26.7.1 躲避拉索	717	27.7.2 回波损耗	761
26.7.2 使用缆车系统	718	27.7.3 使用矢量网络分析仪	761
26.7.3 在铁塔上建造天线	720	27.8 天线场测量	765
26.8 电缆和连接器注意事项	722	27.8.1 天线场测量的基本知识	765
26.8.1 同轴电缆	722	27.8.2 测试地点的建立和评估	766

27.8.3 绝对增益的测量	768	28.3.2 第二部分——馈电系统与天线组装	780
27.8.4 辐射方向图的测量	769	28.3.3 第三部分——记录	781
27.9 参考文献	771	28.3.4 第四部分——自制天线	781
第 28 章 天线系统故障排除	773	28.3.5 第五部分——on-Air 观测	781
28.1 针对初学者的天线系统故障排除方法	773	28.3.6 八木天线中的高 SWR 故障排除	781
28.1.1 测试准备	774	28.3.7 其他天线（非八木天线）中的高 SWR 故障排除	782
28.1.2 测试第一步	774	28.3.8 八木天线馈点阻抗注意事项	784
28.1.3 天线系统测试	774	28.4 铝天线翻新	784
28.2 天线系统故障排除指南	777	附录	786
28.2.1 测试测量	777	词汇表	786
28.2.2 机械	778	缩略语	790
28.2.3 邻近效应	778	长度变换	793
28.2.4 馈电系统	779	公制等值变换	794
28.2.5 误区	780	增益参照量	794
28.3 天线问题分析	780		
28.3.1 第一部分——SWR	780		

第 1 章

天线基本理论

尽管生活中有大量的各种各样天线,但是它们的基本特征相同,并且其设计目的都是为了发射或接收电磁波。在本章中,首先介绍电磁波的定义以及如何描述电磁波;然后对天线的重要特征进行定义和说明,即阻抗、方向性和极化,

以及这些参数的测量和显示;最后,该部分论述了暴露在电磁波环境中的人体所受到的伤害,同时介绍了人们在使用所有天线过程中的必要措施和电磁波安全问题。

1.1 电磁场和电磁波的介绍

1.1.1 电场和磁场

1820 年, Hans Oerstad 发现, 电流流经导线时, 会使导线附近的磁针发生偏转。我们把这归因于电流的磁效应或者磁场, 在其周围任何给定位置上用字母 H 表示。磁场既有大小 (A/m , 安培每米), 又有方向 (方向也可以说是一个关于参考方向的相位值)。因为磁场既包括大小, 又有方向, 故是一个矢量。

图 1-1 中所示是一个典型的实验。图中小磁针的排列就是磁场的形状。该场分布与竖直天线的场分布极其相似。

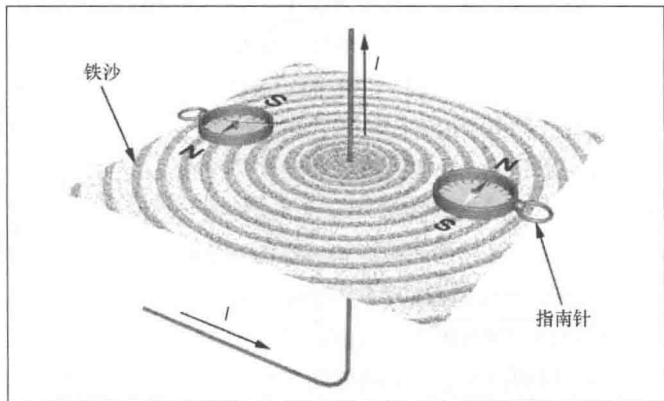


图1-1 磁场的可视图。电流流经导体时周围的磁场形状, 用小磁针的分布表示。磁针的指向即磁场 (H) 的方向。小磁针的分布大致给出了与导体垂直的平面内的磁场形状。

小磁针 (本身就是一个小的磁体) 总是试图与磁场 H 的方向保持平行。当磁针围绕导体运动时, 磁针的指向也随之改变。磁针的指向就是磁场 H 的方向。当你试图将磁针从原来的位置移开时, 你会发现存在一个力阻止磁针离开原来的位置。力的大小与磁针所在位置处的磁场强度成正比——称之为该点的场强或 H 的幅度。导体中的电流变大时, 由它产生的磁场也会变大。流经天线的电流也会产生磁场, 该磁场即为近场的一个分量。如果导体中所流过的电流增大, 那么 H 的幅值也会相应地增大。天线导体中的电流也会产生磁场。

天线周围还存在电场 (E), 该电场可以通过一个平板电容进行观察, 如图 1-2 所示。将一节电池 (其电势为 V_{dc}) 连接在平板电容的两端, 电容两板之间的电场为 E , 如图中带箭头的线条所示。矢量 E 的单位 V/m (伏特每米), 所以电容两端电势为 V , 距离为 d 时, $E = V/d(V/m)$ 。 V 增大或 d 减小, 则 E 增大。天线中, 天线的各部分之间, 天线与地面之间存在交流电势差。这些电势差确定了与天线相关的电场。

数学教程

在本书中, 你将会遇到很多中间级的数学运算, 如果你愿意重新复习一下你的数学计算技巧或者了解一些你不熟悉的方法, 那么 ARRL 网站的“数学教程”专栏 (网址为 www.arrl.org/tech-prep-resource-library) 都列出了一系列免费的在线数学教程。