

天线工程手册

林昌禄 主 编

聂在平 副主编

肖笃墀 汪茂光 阮颖铮 主 审



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

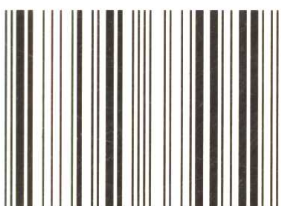


电子工业出版社

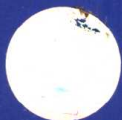
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

www.phei.com.cn

ISBN 7-5053-7495-8



9 787505 374959 >



责任编辑: 龚兰方 李新社

特约编辑: 严晓 庞诚

封面设计: 朱仁平

ISBN 7-5053-7495-8/TN · 1561 定价: 260.00 元

天 线 工 程 手 册

主 编 林昌禄
副主编 聂在平
主 审 肖笃墀 汪茂光 阮颖铮

電 子 工 業 出 版 社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 摘 要

本手册是根据国内最著名的天线专家、教授的最新研究与工程设计成果并汇集了国际上的最新资料精心编撰而成的宏篇巨著,是目前国内第一本全面论述天线工程最系统、最完整的工具书。全书共分四篇 29 章。第一篇为天线基础,介绍了天线的基本参数、基本原理、基本理论和基本分析方法,为读者阅读后续各章打下坚实基础;第二篇为天线设计,是全书的核心,介绍各类天线的工作原理和设计方法,可供使用的设计公式、图表和具体数据;第三篇概述天线在通信、雷达、导航、遥测、测向等军民方面的应用,还介绍了特殊用途的天线,如载体天线、圆极化天线、毫米波天线等;第四篇介绍了与天线相关的论题,如天线的测量、天线散射截面、天线罩等。

本手册工程浩大,内容丰富、实用,具有很强的可读性和可操作性。本书适合于从事天线的研究、设计、使用、维修的工程技术人员,无线信息传输系统总体设计人员阅读,还可供有关专业的大专院校师生参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,翻版必究。

图书在版编目(CIP)数据

天线工程手册/林昌禄主编. —北京:电子工业出版社,2002.6

ISBN 7-5053-7495-8

I. 天... II. 林... III. 天线—手册 IV. TN82-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 009859 号

责任编辑:龚兰方 李新社 特约编辑:严 晓 庞 诚

印刷者:北京市增富印刷有限责任公司

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编:100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:79.25 字数:2600 千字

版 次:2002 年 6 月第 1 版 2002 年 6 月第 1 次印刷

印 数:2500 册 定价:260.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系调换。电话 68279077

编委会名单

主 编 林昌禄
副主编 聂在平
主 审 肖笃樾 汪茂光 阮颖铮

编委及各章执笔人员

第 1 章、第 2 章、 第 9 章	林昌禄	第 16 章、第 22 章	杨可忠	
第 3 章、第 4 章、 第 5 章	聂在平	第 17 章	相正平	
第 6 章	李世智	第 18 章	石 镇	姚中兴
第 7 章	汪茂光	第 19 章	汪文秉	
第 8 章	周朝栋	第 20 章	宋锡明	
第 10 章	李浚沛	第 21 章	曾庆雄	
第 11 章	吕善伟	第 23 章	冯祖伟	郑学誉
第 12 章	王元坤	第 24 章	戴兆之	
第 13 章	郭燕昌	第 25 章	毛康侯	
第 14 章	钟顺时	第 26 章、第 27 章	阮颖铮	
第 15 章	陈木华	第 28 章		
		第 29 章	毛乃宏	张福顺

技术顾问

茅于宽 任 朗 谢处方 肖笃樾

序 言

天线是无线电设备的耳目。它日新月异的发展,使得《天线工程手册》成为天线工作者所必备的工具书。我国在 20 世纪 60 年代和 20 世纪 80 年代曾分别翻译出版过两种版本的《天线工程手册》,对广大天线工作者提供过方便。由于技术的不断发展,新的理论、分析方法和新型天线层出不穷,为了结合我国工程应用的实际,出版一本由我国专家、学者编写的《天线工程手册》已成为我国从事天线研究和实际工作人员的强烈要求。由林昌禄教授主编,我国著名大学和研究所的专家、学者编写的《天线工程手册》满足了这一要求。我相信它的出版将对广大天线工作者提供方便,并对我国天线事业的发展起到良好的作用。

中国天线学会主席 茅于宽

前 言

《天线工程手册》是一本有关各种天线工程设计和制作的纲要性书籍。全书汇集了在无无线电信息传输设备中广泛使用的各类天线的具体设计方法及相关公式、图表等大量数据资料,具有很强的可读性和可操作性,它不仅对从事天线研究、设计、使用、维修工作的工程技术人员有重要的使用意义,而且对从事无线电信息传输系统总体设计的相关人员及有关专业的大专院校师生也有参考价值。

全书共分四篇 29 章。

第一篇为天线基础,包括第 1 至第 7 章,介绍了天线的基本参数、基本原理、基本理论、基本分析方法等,为手册后续各章的阅读打下一个良好的基础,使读者对天线的一些基础知识有较全面的了解。

第二篇为天线设计,包括第 8 章至第 19 章,介绍了各类天线的工作原理和设计方法,它是本手册的核心内容。各章所述天线均汇集有可供直接使用的设计公式、图表和具体数据。

第三篇为天线应用,包括第 20 章至第 26 章,介绍了天线在通信、雷达、导航、遥测、测向等军民方面的应用,还包含了一些特殊应用场合的天线(如载体天线、圆极化天线、毫米波天线等)。由于电视、广播方面的天线已有不少专著和手册出版,故本书未另辟章节讲述,但该应用领域的天线在本手册中亦不难找到。

第四篇为相关论题部分,包括第 27 章至 29 章,介绍了与天线相关的一些工程问题、天线测量、天线罩、天线散射截面等内容。

本手册的编写工作量很大,它包含了国内众多天线工作者的辛勤劳动。参编者二十余人,他们均是国内在该天线领域有丰富工程经验和较高学术造诣的专家,从而保证了本书的质量和权威性。

本手册的编写是在天线学界前辈茅于宽、任朗、谢处方、肖笃墀等教授的关心和指导下完成的。陈敬熊、胡树豪、章日荣、柯树人等专家由于工作或身体方面的原因未能参编,但他们对本手册的出版工作仍给予了充分的支持和帮助,在此一并致谢。

本手册是几十位作者分工编写而成,尽管统稿时作了不少工作,但各章编写风格可能仍会有差异。作为一本工具书,我们首先考虑的是方便读者查阅,因此,天线设计和天线应用部分之间难免有少许内容上的重复,为了保持各章的相对独立和完整性,加之重复部分讲述方法和出发点也不尽相同,故我们仍保留了它们。

本手册编辑、出版工作十分繁重,电子工业出版社的有关领导和工作人员付出了大量的心血,特别是在组稿、审稿、编辑到出版中都作了很多工作,并给予具体的指导和帮助,在此特向他们表示感谢。

限于编者水平,本手册难免有疏漏或不妥之处,恳请读者批评指正。

主 编

读者信息反馈卡

感谢您购买本书! 为了对读者更好地服务,请填写本卡,寄回我社龚兰方!

地址:北京 173 信箱 邮编:100036 电话:(010)68159016

E-mail: glf@phei.com.cn

一、购买图书书名和书号: _____

二、您的职业: 公务员 教师 公司职员 学生 其他

三、您的文化程度: 研究生 本科 专科 其他

四、您对本书的评价

1. 内容表述: 很满意 满意 尚可 不满意 极不满意

2. 编辑校对: 很满意 满意 尚可 不满意 极不满意

3. 纸张印刷: 很满意 满意 尚可 不满意 极不满意

4. 封面设计: 很满意 满意 尚可 不满意 极不满意

五、您的通信地址及电话: _____

六、您最希望我们出版的图书及您的建议

目 录

第一篇 天线基础

第 1 章 引言	(1)
1.1 天线功能	(1)
1.2 天线类型	(1)
1.3 场区划分	(2)
1.4 功率传输	(3)
第 2 章 天线的基本参数	(5)
2.1 天线方向图	(5)
2.2 方向性系数	(8)
2.3 天线增益	(10)
2.4 天线阻抗	(11)
2.5 天线有效长度和有效面积	(12)
2.6 天线效率	(13)
2.7 天线极化	(13)
2.8 天线带宽	(15)
2.9 天线噪声温度	(16)
第 3 章 电磁场的基本原理	(17)
3.1 麦克斯韦方程和电磁场边界条件	(17)
3.2 格林函数与叠加原理	(21)
3.3 场的互易原理	(22)
3.4 惠更斯原理和克希荷夫近似	(23)
3.5 二重性原理	(24)
3.6 巴俾涅原理	(25)
3.7 镜像原理	(27)
3.8 场的相似变换原理	(28)
3.9 场的惟一性定理	(29)
第 4 章 电磁辐射的基本理论和基本公式	(31)
4.1 电流元的辐射	(31)
4.2 磁流元的辐射	(33)
4.3 离散阵列辐射	(34)
4.4 线源辐射	(36)
4.5 孔径辐射	(38)
4.6 孔径增益及其限制	(41)
第 5 章 接收天线	(44)
5.1 接收天线等效电路、匹配以及天线有效面积	(44)
5.2 天线的矢量有效高度	(45)
5.3 阻抗失配与极化失配	(45)
5.4 接收天线的噪声温度	(46)
5.5 收、发路径损失	(47)
第 6 章 低频辐射分析方法	(48)
6.1 线辐射体场的积分表达式	(48)

6.2 典型天线的数值特征	(50)
6.3 频域分析方法	(56)
6.4 时域分析方法	(65)
6.5 数值解的正确性检查	(77)
参考文献	(77)
第7章 高频辐射分析方法	(78)
7.1 引言	(78)
7.2 波前、射线和几何光学	(79)
7.3 物理光学场	(86)
7.4 几何绕射理论和一致性几何绕射理论	(89)
7.5 等效电磁流法(ECM)	(130)
7.6 物理绕射理论(PTD)及其修正	(133)
参考文献	(139)

第二篇 天线设计

第8章 偶极与单极天线	(142)
8.1 引言	(142)
8.2 直线形偶极天线	(142)
8.3 V形偶极天线	(158)
8.4 折线与曲线偶极天线	(164)
8.5 其他形式的偶极天线	(167)
8.6 单极天线	(182)
8.7 偶极子加载	(212)
8.8 电小天线	(217)
8.9 匹配与平衡	(218)
8.10 小结	(236)
参考文献	(238)
第9章 环天线	(239)
9.1 引言	(239)
9.2 电小环天线	(239)
9.3 电大圆环天线	(243)
9.4 屏蔽式圆环天线	(254)
9.5 多角形环天线	(256)
9.6 双三角形环天线	(260)
9.7 加载环天线	(267)
参考文献	(269)
第10章 隙缝天线	(271)
10.1 前言	(271)
10.2 波导隙缝的形式	(271)
10.3 隙缝的归一化等效阻抗(导纳)解析式	(273)
10.4 隙缝的电参数	(276)
10.5 隙缝阵列天线	(284)
10.6 匹配隙缝阵列天线	(297)
10.7 窄边隙缝的交叉极化辐射和抑制方法	(299)
10.8 加工误差对隙缝阵列天线的影响	(301)
10.9 功率容量	(302)

参考文献	(303)
第 11 章 行波天线	(305)
11.1 行波天线的基本原理	(305)
11.2 长线天线与 V 形天线	(306)
11.3 菱形天线	(310)
11.4 螺旋天线	(314)
11.5 八木天线	(324)
11.6 表面波天线	(329)
11.7 漏波天线	(342)
参考文献	(355)
第 12 章 宽频带天线	(357)
12.1 宽频带天线的基本概念	(357)
12.2 宽带振子天线	(359)
12.3 加载天线	(369)
12.4 非频变天线	(381)
12.5 宽频带喇叭天线	(402)
12.6 超宽频带接收天线	(410)
12.7 宽频带匹配技术	(413)
参考文献	(427)
第 13 章 线阵和平面阵	(429)
13.1 阵列天线基础	(429)
13.2 线阵	(430)
13.3 平面阵	(444)
13.4 方向性和信噪比的最佳化	(450)
13.5 方向图综合	(452)
参考文献	(462)
第 14 章 微带天线	(463)
14.1 概述	(463)
14.2 微带贴片天线	(466)
14.3 微带振子天线和微带隙缝天线	(494)
14.4 宽频带、多频段和频率捷变技术	(503)
14.5 微带线形天线与微带线阵	(509)
14.6 微带面阵天线	(519)
参考文献	(526)
第 15 章 喇叭天线	(531)
15.1 通论	(531)
15.2 主模喇叭天线	(536)
15.3 双模喇叭天线	(547)
15.4 多模喇叭天线	(553)
15.5 波纹喇叭天线	(562)
15.6 组合喇叭天线	(573)
15.7 其他形式的喇叭	(581)
15.8 校正喇叭口面场的相位分布与透镜天线	(585)
参考文献	(589)
第 16 章 反射面天线	(591)
16.1 基本方法和基本公式	(591)

16.2	单反射面天线——抛物面天线	(594)
16.3	双反射面天线	(602)
16.4	赋形双反射面天线	(610)
16.5	对称双镜天线的效率分析	(612)
16.6	单偏置抛物面天线	(616)
16.7	双偏置抛物面天线	(625)
16.8	波束扫描反射面天线	(628)
16.9	溅散板馈源天线	(638)
16.10	喇叭抛物面天线	(641)
16.11	抛物柱面天线	(643)
16.12	等强度线波束天线	(645)
	参考文献	(647)
第 17 章	相控阵天线	(649)
17.1	相控阵天线参数计算公式	(649)
17.2	相控阵天线辐射方向性和旁瓣的控制	(654)
17.3	阵元辐射器的选择	(660)
17.4	移相器的选择	(666)
17.5	相控阵馈电网络的设计	(672)
17.6	相控阵天线的带宽	(678)
17.7	相控阵天线宽带和宽角匹配方法	(681)
17.8	相控阵的量化误差	(684)
17.9	频率扫描天线阵	(687)
	参考文献	(692)
第 18 章	信号处理天线与阵列信号处理技术	(693)
18.1	引论	(693)
18.2	信号处理天线	(694)
18.3	自适应空域滤波天线	(718)
18.4	自适应抗干扰天线系统	(737)
18.5	空间谱估计技术	(742)
	参考文献	(749)
第 19 章	时域天线	(751)
19.1	时域天线的研究对象及指标	(751)
19.2	偶极天线	(751)
19.3	隙缝辐射器	(754)
19.4	偶极子用作接收天线	(754)
19.5	加载天线	(755)
19.6	渐近线喇叭天线	(756)
19.7	频率无关天线用作时域天线	(757)
19.8	脉冲阵列天线	(759)
19.9	时域口径辐射及时域面天线	(763)
19.10	时域接收天线与发射天线的关系	(766)
19.11	馈电问题	(768)
	参考文献	(769)

第三篇 天线应用

第 20 章	圆极化天线	(770)
---------------	--------------	-------

20.1	引言	(770)
20.2	圆极化波的特性与参数	(770)
20.3	圆极化器	(773)
20.4	电磁振子圆极化天线	(797)
20.5	螺旋天线	(799)
20.6	隙缝圆极化天线	(803)
20.7	微带圆极化天线	(804)
20.8	反射器圆极化天线	(812)
20.9	变极化天线	(815)
20.10	其他圆极化天线	(817)
	参考文献	(822)
第 21 章	长、中、短波和超短波通信天线	(823)
21.1	长、中波通信天线设计考虑	(823)
21.2	长、中波通信天线的基本形式及方向性	(823)
21.3	Γ 型与 T 型天线	(825)
21.4	笼 T 型天线	(833)
21.5	高 Q 铁氧体加感天线	(833)
21.6	短波通信天线设计	(839)
21.7	水平极化与垂直极化短波通信天线	(842)
21.8	宽带短波通信天线	(856)
21.9	超短波通信天线设计	(867)
21.10	超短波接力通信天线	(869)
21.11	移动通信天线	(873)
	参考文献	(877)
第 22 章	卫星通信天线	(879)
22.1	卫星通信天线发展状况	(879)
22.2	对称型双反射镜卫星通信地球站天线的设计	(881)
22.3	对称双镜天线的赋形技术	(892)
22.4	卫星通信天线获得低旁瓣的办法	(905)
22.5	对称型双镜卫星通信天线旁瓣源的分析与计算	(907)
22.6	馈源的设计与选择	(918)
22.7	多波束卫星通信地球站天线	(928)
22.8	跟踪体制及选择	(932)
	参考文献	(939)
第 23 章	雷达天线	(940)
23.1	雷达天线的一般设计要求	(940)
23.2	笔形波束天线	(945)
23.3	扇形波束天线	(945)
23.4	赋形波束天线——余割平方天线	(948)
23.5	精密跟踪雷达天线——单脉冲天线及馈源设计	(951)
23.6	雷达天线的电扫描精度及波束控制	(962)
23.7	超视距雷达天线	(970)
23.8	合成口径天线	(974)
	参考文献	(978)
第 24 章	测向天线	(980)
24.1	测向系统天线设计原则	(980)

24.2	测向系统单元天线	(980)
24.3	测向系统的宽孔径天线	(983)
24.4	多波束测向	(986)
24.5	伏尔与多普勒伏尔地面天线	(992)
24.6	塔康天线	(994)
24.7	仪表着陆系统和微波着陆系统天线	(997)
24.8	环境对测向天线场性能的影响	(1000)
24.9	测向天线系统的误差分析与性能评估	(1004)
	参考文献	(1022)
第 25 章	飞行体上的天线	(1023)
25.1	飞行体上的天线	(1023)
25.2	椭圆柱面和双曲柱面上的天线	(1025)
25.3	椭圆柱体上的天线	(1037)
25.4	圆锥体上的天线	(1045)
25.5	椭球体上的天线	(1050)
25.6	飞行体天线的电磁兼容	(1056)
	参考文献	(1059)
第 26 章	毫米波天线	(1062)
26.1	概述	(1062)
26.2	反射面天线与毫米波馈源	(1064)
26.3	表面波与漏波天线	(1067)
26.4	微带天线与其他的印制天线	(1099)
26.5	集成天线	(1108)
	参考文献	(1111)

第四篇 相关论题

第 27 章	天线罩	(1113)
27.1	一般设计考虑	(1113)
27.2	外形与结构	(1114)
27.3	材料选择	(1115)
27.4	电磁性能设计	(1126)
	参考文献	(1141)
第 28 章	天线的雷达散射截面	(1143)
28.1	一般概念	(1143)
28.2	反射面天线的 RCS	(1147)
28.3	阵列天线的 RCS	(1162)
28.4	天线 RCS 的减缩	(1182)
28.5	天线 RCS 的测量	(1187)
	参考文献	(1194)
第 29 章	天线测量	(1196)
29.1	天线测试场的设计与鉴定	(1196)
29.2	振幅方向图测量	(1201)
29.3	增益测量	(1210)
29.4	极化测量	(1219)
29.5	相位测量	(1223)
29.6	近场测量	(1226)

29.7 阻抗测量	(1235)
29.8 模型天线法	(1242)
29.9 射电源法	(1243)
29.10 天线的时域测量.....	(1248)
参考文献	(1250)

第一篇 天线基础

第1章 引言

1.1 天线功能

天线在无线电设备中的主要功能有两个:第一个是能量转换功能,第二个是定向辐射(或接收)功能。

能量转换功能是指行波与自由空间波之间的转换,发射天线是将馈线引导的电磁波(高频电流)转换为向空间辐射的电磁波传向远方,接收天线是将空间的电磁波转换为馈线引导的电磁波(高频电流)送给接收机。

定向作用是指天线辐射或接收电磁波具有一定的方向性,根据无线电系统设备的要求,发射天线可把电磁波能量集中在一定方向辐射出去,接收天线可只接收特定方向传来的电磁波。

可以看出,发射天线和接收天线之间的关系类似于发电机与电动机之间的关系,前者是在导行波与自由空间波之间往返变换,后者则在机械能和电能之间往返变换,这种相似性表明:收、发天线之间存在着一定的可逆性。第三章中互易原理的讨论将证明,只要天线中不含有非线性材料(如铁氧体器件),同一副天线用作发射和用作接收时,其基本特性保持不变。因此,本手册中讨论的各种类型天线一般都不特别注明它是发射天线或是接收天线(除特殊应用场合外),都按发射天线处理。

1.2 天线类型

随着无线电技术的飞速发展和无线电设备应用场合的日益扩展,已出现了适于不同用途、种类繁多的天线,在天线工程设计中选择哪种类型天线很大程度上取决于特定应用场合系统的电气和机械方面的要求。

对品种繁多的天线进行分类是件十分困难的事。若按工作性质可分为发射天线和接收天线两大类;若按用途则可分为通信天线、雷达天线、广播天线、电视天线等;若按频段又可分为长波天线、中波天线、短波天线、微波天线等。但这些分类法都显得笼统,不太科学。

因为有的天线既可作发射又可作接收,甚至可收发共用;有的天线既可用于通信又可用于雷达;有的天线既适用于短波又适用于超短波甚至微波。很难将它归属于哪一类。

本手册将从三个大的方面来讨论天线工程问题,即天线基础、天线设计和天线应用。在天线分类上则按天线辐射方式进行,适当考虑天线结构、工作频段和应用等因素。我们将天线分为四组基本类型:线元天线、行波天线、阵列天线和孔径天线。它们适用的频率范围和天线的大致电尺寸如图 1-1 所示。表 1.1 中举出了一些常用天线实例及其归属的天线类别。

当然,将天线类型简单地划分为这四组基本形式也仅是一种近似,不能说它有十分严密的科学性,因为总还能找到一些例外。但这种分类法有利于读者对本手册的查阅。

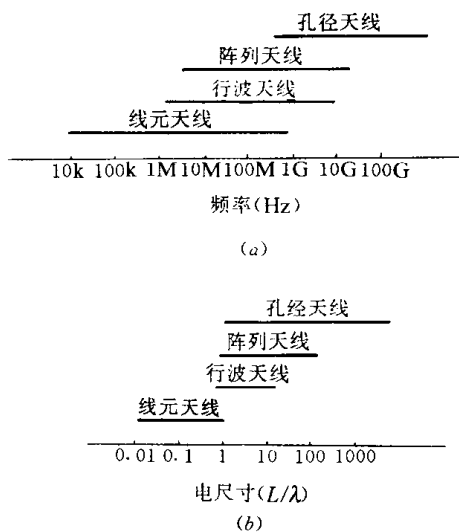


图 1-1 天线分类

表 1.1 天线类型

线元天线	行波天线	阵列天线	孔径天线
单极天线	长线天线	侧射阵	角锥喇叭
偶极天线	菱形天线	端射阵	扇形喇叭
环天线	螺旋天线	直线阵	圆锥喇叭
隙缝天线	八木天线	平面阵	多模喇叭
载体天线	对数周期天线	圆形阵	混合模喇叭
微带天线	慢波天线	共形阵	波纹喇叭
加载天线	快波天线	信号处理阵	抛物面喇叭
有源天线	漏波天线	自适应阵	脊形喇叭
双锥天线	表面波天线	多波束阵	单反射面天线
鞭状天线	长介质棒天线	相控阵	双反射面天线
		密度加权阵	球形反射面天线
		极低副瓣阵	偏置反射面天线
			环焦反射面天线
			切割反射面天线
			孔径扫描天线
			透镜天线
			角形反射面天线
			背射天线

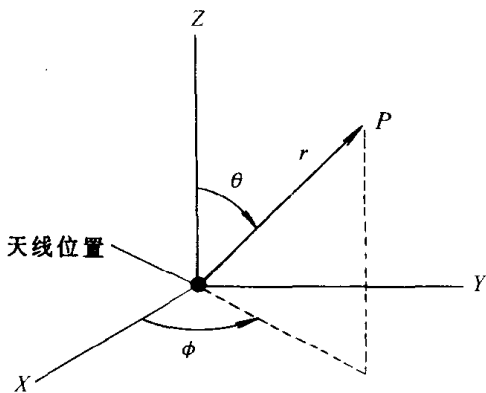


图 1-2 球坐标中的天线

1.3 场区划分

假设将一发射天线置于图 1-2 所示球坐标系统的原点处,它向周围辐射电磁波,则其周围的电磁波功率密度(或场强)分布一般都是距离 r 及角坐标 (θ, φ) 的函数。因此,根据离开天线距离的不同,将天线周围的场区划分为感应场区,辐射近场区和辐射远场区。

1.3.1 感应场区

感应场区是指很靠近天线的区域。在这个场区里,电磁波的感应场分量远大于辐射场,而占优势的感应场之电场和磁场的时相时间相位相差 90° ,坡印亭矢量为纯虚数,因此,不辐射功率,电场能量和磁场能量相互交替地贮存于天线附近的空间内。图 1-3(a)所示电尺寸小的偶极天线,其感应场区的外边界是 $\lambda/2\pi$ 。这里, λ 是工作波长。无限大孔径天线不存在感应场区,有限大孔径天线,在其中心区域感应场区仍可忽略,只是在孔径边缘附近存在感应场。感应场随离开天线距离的增加而极快衰减,超过感应场区后,就是辐射场占优势的辐射场区了。图 1-3(b)所示电尺寸大的孔径天线的辐射场区又分为近场区和远场区。

1.3.2 辐射近场区

辐射近场区里电磁场的角分布与离开天线的距离有关,即在不同距离处的天线方向图是不同的。这是因为:(a)由天线各辐射元所建立的场之相对相位关系是随距离而变的;(b)这些场的相对振幅也是随距离而改变的。在辐射近场区的内边界处(即感应区的外边界处),天线方向图是一个主瓣和副瓣难分的起伏包