

沈连丰
编

无线电概论

东南大学出版社



73.45/44

无线电概论



无线电概论
沈连丰



东南大学出版社

(苏)新登字第 012 号

内 容 简 介

本书概括性地介绍了“无线电”这一学科的产生、发展和未来前景,综述了该领域的主要理论、技术问题,以及在广播、电视、通信、雷达、声纳、电子对抗、遥控遥测等方面的应用情况,对构成无线电设备的元器件和微电子学的发展应用情况也作了简单介绍。

本书可用作工科院校低年级教材,参考学时数约 30 学时,也可供广大无线电爱好者阅读参考。

无 线 电 概 论

沈连丰 编

东南大学出版社出版

南京四牌楼 2 号

江苏省新华书店发行 东南大学印刷厂印刷

开本 850 × 1168 毫米 1/32 印张 5.625 字数 126.56 千

1992 年 6 月 第 1 版 1992 年 6 月 第 1 次印刷

印数: 1—1000 册

ISBN7—81023—615—6

TN·57

定价: 2.50

东南大学出版社

前言

“无线电概论”是为无线电系低年级学生开设的一门必修课，主要概括介绍无线电学科的主要理论问题、技术问题及应用情况等，旨在使学生学习专业课程之前，既能了解无线电的过去、现在和将来的概貌，提高学习后续课程的兴趣，又能建立一些系统的概念。几年来的教学实践表明，这门课程对拓宽学生的知识面、提高学习的主动性是有帮助的。

这是一门大的学科的概论课。今天，无线电已经是一个与人类社会息息相关的综合性学科，它的飞速发展，浸透着许多其它学科的研究成果，因此，它的基本原理及巨大成就，必将对其它学科产生影响，这也是我们把这门课作为工科院校公共选修课的一个基本出发点。

如果把麦克斯韦预言电磁波的存在作为无线电学科理论研究的开端，那么，一个多世纪以来，它始终是日新月异地发展着，要在有限的篇幅和较短的学时中概括出来确实是非常困难的。因此，我们力图站在学科的高度，以“系统”来概括，以“概念、概要”来体现，尽可能深入浅出，并较多地介绍一些新的研究成果及方向性的研究课题。我们期望读完这门课程对学习其它课程能有所帮助，也期望读完有关后续课程后再来翻翻这本小册子仍能有所裨益。

本教材的第一稿写于1987年，从构思到编写的整个过程中，始终得到毕光国教授的鼓励和指导，林福华教授、祝宗泰、巫之鹤副教授等九位老师及无线电研究室的数十名研究生对其大纲和初稿提出了许多宝贵的建议，刘家俊副教授进行了审稿，其后根据教学实践和需要，进行了三次大的修改，印刷了三次油印讲义，林福华教授逐字逐句进行了审阅，提出了不少修改建议；为

此书出版，教务处和本系领导给予极大的支持和帮助，编者根据数次教学体会和学生的反馈信息，又作了较大的修改。另外，本书的许多内容源于编者的科研实践、东南大学无线电系的研究成果以及较多的参考文献，刘彤同志帮助绘制了全书的图稿。编者在此谨向上述领导、老师和同志们诚挚致谢。尽管如此，由于本人站在十分有限的高度上，学识水平不高，不妥和错误之处在所难免，恳请读者和同仁不吝指正。

编者于东南大学

1990年7月

目 录

第一章 无线电学科的产生与发展	1
一、麦克斯韦预言电磁波的存在.....	1
二、无线电的发明.....	2
三、无线电和人类社会.....	5
四、无线电学科的理论研究和工程应用.....	6
第二章 无线电信号	9
一、无线电系统传输的信号.....	9
1. 系统和信号.....	9
2. 无线电信号的分类.....	10
二、信号的时域特征.....	13
1. 时域的一般表示法.....	13
2. 傅里叶级数表示法.....	15
三、频谱和带宽.....	16
1. 频谱的概念.....	16
2. 频域表示法.....	18
3. 有效带宽.....	19
四、基带信号和已调信号.....	20
1. 基带信号.....	20
2. 调制和解调的概念.....	21
3. 幅度调制信号.....	22
4. 调角信号.....	26
5. 数字载波调制信号.....	28
6. 复合调制和多重调制.....	29
7. 几种已调信号的比较.....	31
五、无线电信号的传播.....	32

六、频率资源的利用和开发	32
七、信号的测量	35
八、信号处理理论和技术简介	36
第三章 无线电广播和电视	39
一、广播电台和无线电接收机	40
1. 广播电台	40
2. 无线电接收机	43
3. 广播收音机的新发展	51
二、调频立体声广播和接收	51
1. 调频广播	52
2. 立体声广播	53
3. 矩阵方式的立体声调制器和解调器	60
4. 立体声系统的分离度	61
三、电视	62
1. 电视发展概述	62
2. 实现电视的基本原理	64
3. 黑白全电视信号	66
4. 彩色全电视信号	68
5. 电视系统的构成	71
6. 电视技术的成就及发展趋势	76
第四章 无线电通信	79
一、通信系统概述	79
1. 通信的概念	79
2. 无线电通信的主要类型	80
3. 通信方式	81
4. 通信系统的性能指标	83
二、信息、编码和检测理论	83
1. 信意和系统容量	84
2. 信源编码和信道编码	87
3. 微弱信号检测	88

三、无线信道	88
四、模拟通信	90
1. 模拟通信的基本问题	91
2. 多波道调频电台举例	94
五、数字通信	97
1. 数字通信的特点	97
2. 时分复用 (TDM)	99
3. PCM 的原理	101
4. ΔM 的原理	103
5. PCM 数字电话的系列标准	108
6. 数字通信的优缺点	108
六、从超长波到光波通信	111
1. 短波通信	112
2. 微波通信	115
3. 光通信	119
七、光纤、卫星和移动通信	122
1. 光纤通信	122
2. 卫星通信	123
3. 移动通信	132
八、通信的保密性问题	136
九、现代通信网与通信技术发展动向	137
十、计算机和通信	139
第五章 无线电的广泛应用	142
一、雷达	142
1. 雷达的发明与发展	142
2. 雷达的基本工作原理	143
3. 雷达的主要分类	147
4. 雷达应用举例	149
二、声纳	150
三、电子对抗	151

四、遥测、遥控、遥感	153
1. 遥测的概念及系统模型	153
2. 遥控的概念及系统模型	155
3. 遥测遥控的广泛应用	156
4. 遥感原理	157
五、无线电在气象学和天文学上的应用	159
六、无线电的其它应用	161
第六章 电子元器件和微电子学	163
一、电路的基本元件	163
二、电子管的发明与发展	165
1. 真空二极管的发明	165
2. 德福雷斯特成为真空三极管的发明者	166
3. 各种各样的电真空器件	167
三、微电子学的发展及其辉煌成果	167
1. 晶体管的发明及应用	167
2. 第三代电子器件	169
3. 电子学的新纪元	170
主要参考文献	171

第一章 无线电学科的产生与发展

无线电，在上世纪末还是个鲜为人知的新名词。那时，它是指不用金属导线而借助电磁波来传输莫尔斯电码的通信技术和通信装置。今天，“无线电”已远远超出当时的范围，上至天文，下至地理；大到宇宙空间、小到核子、粒子的研究；从国防建设、工农业生产到社会家庭生活，没有一处能够脱离无线电技术，无线电电子学已成为和人类社会息息相关的综合性学科。而电磁波的发现揭开了无线电学科研究和发展的序幕。

一、麦克斯韦预言电磁波的存在

19世纪上半期，人们对电和磁之间的关系有许多新认识。1820年，丹麦物理学家奥斯特发现了“电流的磁效应”。1831年，英国实验物理学家法拉第发现了“电磁感应现象”。这两个重大发现清楚地说明：电和磁可以互相产生。它们奠定了现代电工学的基础，对后来发电机和变压器的发明以及交流电在生产上的广泛应用起着决定性的作用，也埋下了无线电发明的种子。

1854年，23岁的麦克斯韦刚从剑桥大学毕业，就对法拉第的研究产生了强烈的兴趣，准备用数学语言，精确地、严格地描述前人所发现的电磁现象。

1855年，麦克斯韦发表题为“论法拉第力线”的论文，首次对电磁场进行定量描述和分析。1862年，他在“论物理学的力线”一文中，提出了电磁场的力学模型，并指出变化的磁场能够产生电场，变化的电场能产生磁场。

1864年，麦克斯韦在英国皇家学院宣读了他的第三篇著名的

电磁学论文“电磁场的力学理论”，严格地推导出完整的电磁场波动方程，预言电磁波的存在，还得出电磁波的传播速度等于光速的重要结论。因此，人们把这一年看作是麦克斯韦预言电磁波存在的一年。

1873年，麦克斯韦的《电磁学通论》出版，他详细地总结了前人有关电磁现象的发现，系统而又创造性地推导出描述电磁规律的“麦克斯韦方程组”这些方程形式都十分简单，但内容却十分丰富，而最重要的，它指出了在时变条件下，电场和磁场是统一的电磁场的两个方面，不可能单独存在，它们以相同的方式互相激发，故意味着存在电磁波。一旦场源激发了电磁波，即使场源不再继续存在，电场和磁场仍可相互激发，以有限速度向远处传播。

麦克斯韦方程是讨论和分析电磁场各种现象的理论基础，也可以看作是无线电学科理论研究的开端。然而麦克斯韦的理论超越了同时代人的心智，他所预见的电磁波更被许多人认为是子虚乌有的空中楼阁，直到1887年，赫兹用实验证明了电磁波的存在，才使无线电由理论向实际应用迈出重要的一步。

二、无线电的发明

自从1887年赫兹完成他的实验后，在欧洲几乎所有大学的物理实验室都配备了赫兹的实验装置，但对电磁波能否被用来传送信息，多数人持否定意见，甚至包括赫兹本人。

那时候，有线电报和有线电话已付使用。早在1837年，美国画家莫尔斯历经5年艰辛努力，试验成功用电码传送信息的电报机。1876年3月10日，美国发明家贝尔和他的助手沃森试验有线电话获得成功，只经过三四年时间，电话通信就已逐渐普及。人们从这些发明中得到了数不尽的好处，甚至有些人认为：如果在通信领域中还有什么事情需要做的话，那就是地下埋电缆和空中

架导线这种敷设线路的工作了。然而这种离不开输电线的通信方式终究不能满足需求，人们期待着不用导线的以及活动目标（如航船）的通信。

1894年，20岁的意大利青年马可尼在一个偶然的机会看到了介绍赫兹的电磁波实验的文章，受到启发，他开始把全部兴趣转移到“无线电”，以顽强的实践精神，自己动手制作无线电报机，在自家的院子里和房顶上进行一次又一次的通信试验。1895年夏天，他在三楼实验室与1.7千米处的山丘之间成功地实现了无线电报通信。1896年，马可尼在一次公开场合作了10~20千米的无线电报通信表演。同年6月2日，他向英国政府提出了编号为12039的无线电报专利申请书。1897年，在英国建立了世界上第一家无线电器材公司——英国马可尼公司，后来制造了许多船用无线电收发报机。1899年3月，马可尼播发了第一封收费电报，电码飞越英吉利海峡，通信距离达45千米，后来人们将这作为无线电诞生的标志。

图1.1是马可尼的无线电报实验装置原理图，它的工作原理十分简单：当按下莫尔斯电键，变压器 R 的初级电流被一个与电铃相似的“断续器”周期性地通断，每一次断流都在 R 的次级线

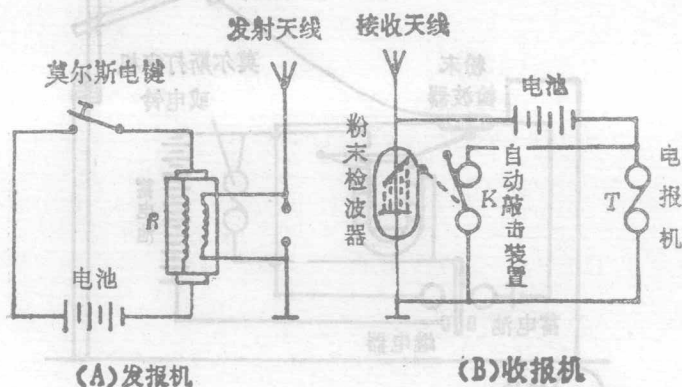


图1.1 马可尼的无线电报实验装置原理图

圈中产生一个很高的感应电压，接在次级线圈上的两个小球之间产生电火花，通过挂在树上的细长天线向周围空间发射出电磁波。在收报机中，也装有一根长导线即接受天线，与粉末检波器相接。平时，检波器管内的金属粉末几乎为绝缘体，但当发射的电磁波到达收报机时，粉末在天线感应电压作用下彼此凝聚，成为电阻仅为几欧姆的导电体，于是在与电池串接的电报机T中便有电流流通，电报机自动记录接收到的电码。为了解决管中的金属粉末一经凝聚后不容易很快分散的问题，他在收报机中附加了一个自动敲击装置。

时代并非造就马可尼一个人，1895年5月7日，俄国的波波夫在俄国物理化学协会物理学部年会上表演了他创造的“雷暴指示器”，其原理如图1.2所示。这实际上就是一架简单的无线电接收机，因为它将高空雷击放电时辐射的电磁波通过电铃或打字机接受并记录下来。当时他已预见到利用电磁波进行通信的可能性。后来苏联政府将1895年5月7日定为“无线电发明日”。

“无线电”的发明权属于谁？围绕这个问题众说纷纭，争论一直持续到今天。实际上，无线电是时代的产物，是汇集了不止

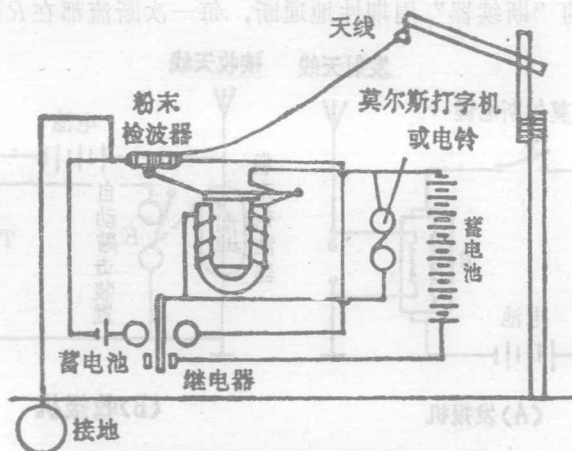


图1.2 波波夫的“雷暴指示器”

一代人的研究成果才发明的，马可尼、波波夫等人是总结了许许多多人的研究成果才达到峰巅，采撷了无线电报这颗明珠。

三、无线电和人类社会

无线电首次向人们展示它的使用价值是1899年3月3日发生的意外事件。那天，一艘名为“东谷德文”的灯船不幸被一艘轮船撞毁下沉，呼叫的无线电码向各邻近海岸和海港频频飞去，于是，救生艇纷纷奔赴出事地点，遇难的船员全部获救。自1903年起，“SOS”成为国际通用的呼救号码，而1912年4月12日发生的英国新建大邮轮“大力神”号冲撞冰山而沉没的悲剧，使各国法律强行规定：凡是具有一定规模的船只必须配备无线电装置。很快，无线电的应用就超出了电报的范畴，无线电话和语言广播出现了，各种类型的电台如雨后春笋般地建立。再进一步就是利用无线电来传送图象，无线电传真和电视广播也很快地发展起来。这些技术把全人类的活动联系在一起，直到今天还显示着旺盛的生命力并在不断地改进和发展着。第二次世界大战前夕发展起来的雷达技术首先在防空上发挥了重要作用，接着在整个国防和国民经济中得到广泛应用。大战末期出现了电子计算机，这一技术和电子器件的研究相互促进，迅猛发展，成为电子工业的两大支柱，如今已是人人皆知的了。今天，无线电已广泛应用于通信、广播、电视、导航、气象、天文等方面，在原子能利用和研究、工业自动化、生物学和医学中也起了重要作用，它几乎已和人类社会的一切文明活动密切相关。宇宙飞船、航天飞机，从它们脱离地面的那一刻起，就只有无线电把它们和地球人类相联系，人类寻求外星人的无线电波仍在太空翱翔……。无线电，改变了人们的时空观，而时空观的改变具有重大意义。现在，人们常说进入了“信息时代”，而信息的传递，尤其是远距离的传递，离不开无线电。人们把无线电的重要领域——通信和交通

一起，作为衡量现代化的两个主要标志，其道理是显而易见的。

四、无线电学科的理论研究和工程应用

如果把1864年麦克斯韦预言电磁波的存在作为无线电学科的理论研究的开始，那么，一百多年以来，无线电得到了突飞猛进的发展，而现在正以比以往任何时候更快的速度和在更广阔的范围内日新月异地发展着。我们今天称它为无线电电子学，它研究的领域之广，涉及数学、物理、化学、天文、地理、医学等基础学科以及几乎所有的工程学科，是一个与人类社会息息相关的综合性学科。但是，我们认为它最核心的内容仍然是通信。我们用图1.3通信系统的一般模型来说明无线电学科的理论研究和工程应用的主要方面。



图1.3 通信系统的一般模型

在图1.3中，我们给出五个信号和六个方框。我们先来看这五个信号。 $g(t)$ 是信息源送出的信号，一般是代表语音、文字、图象、数据等原始信号的电信号，它可能是原始信号经过简单变换（例如语声经过话筒），也可能是经过复杂处理（例如经过编码或计算机）而得到，我们称之为基带信号； $x(t)$ 是送进信道传输的信号，由第二章的介绍将会知道，基带信号一般不适宜在信道中直接传输，往往先将它“调制”到高频载波上，因此我们称 $x(t)$ 为射频已调信号； $n(t)$ 是信道中以及分散在通信系统其它各处的噪声和干扰的总和； $y(t)$ 是到达接收机输入端的信号，显

然，它将体现 $x(t)$ 、 $n(t)$ 和信道三者的特性； $s(t)$ 是经过接收机恢复出的基带信号，它应该和发端的基带信号 $g(t)$ 相同，但由于干扰和噪声的存在以及信道特性等原因，必然有所不同。其次我们来看六个方框。信息源可以是人或是产生基带信号的设备或事物，通常它是某种换能器，把非电量转换为电量，而受信者是接收信息的人、设备或事物，也可能是某种换能器，把电量转换成非电量；发送设备和接收设备分别将 $g(t)$ 和 $y(t)$ 变换成 $x(t)$ 和 $s(t)$ ；信道是指传输信号的媒质；噪声源已如前述。一个实际的系统，尤其是通信网，往往要复杂得多，然而图 1.3 的模型是构成各种通信网络的基础，围绕着图中信号的产生和设备的更新，人们逐步对实践中遇到的问题展开深入的理论研究。显然，它将涉及众多的基础理论学科。然而，最主要的理论基础是什么呢？在近年来的一些国际通信会议上，这个问题引起与会者的浓厚兴趣，比较趋向性的看法是：电动力学、通信理论、半导体物理和计算机科学。

电动力学的基础是电磁场理论。在图 1.3 的模型中，将不可避免地涉及电磁场问题的研究，而麦克斯韦方程是解决各种复杂电磁场问题的基础。但近年来随着深空通信的研究，也有人认为，若想在“中子星”表面或“黑洞”附近进行通信，则需对麦克斯韦方程进行修正。

通信理论是以山农信息论为基础建立起来的，它对通信系统中传输的信号、信道、通信体制及技术等进行系统的分析及最佳设计的研究，先后形成了“山农信息论”，“过滤和预测理论”，“编码理论”，“信源统计特性理论”，“信号与噪声理论”，“调制理论”，“信号检测理论”，“数字信号处理理论”，等等，目前仍在日新月异地发展着。

各种无线电设备都离不开电子器件。事实上，在无线电科学兴起和发展的历程中，电子器件占有特殊重要的地位，每一次重大的技术革命无一不是以新一代的电子器件的出现为先导。目

前,除少数场合还使用电子管外,分立的晶体管其使用范围也越来越小,集成电路在实际上已经基本取代了真空器件和分立元器件,因此,电子器件的理论基础已经转移到半导体物理,尤其是微电子学。目前超大规模集成电路单片已具有数十万计的晶体管,预期本世纪末将会出现有10亿只晶体管的集成块。

几十年来，无线电电子学一直是科学发展的前沿和尖端学科之一，它和其它学科相互渗透，新理论不断出现。然而，它又是一门技术性和工程性很强的学科，它们和理论研究相辅相成，互相促进。尽管这是一门飞跃发展着的包罗万象的科学，但从广义上讲，广播、电视、雷达、导航、遥控、遥测等等都属于通信的范畴，因此，可以说，通信仍是无线电学科中最典型的分支，所以在本书中将以通信方面的内容为主，辅之以其它方面的应用，对无线电的基本原理及其广泛应用，作一个概括性地介绍。